

**PETROL VE DOĞALGAZ BORU HATLARI İÇİN ÜRETİLEN
BORULARIN TOZALTI VE SPİRAL KAYNAK YÖNTEMİYLE
KAYNAKLANABİLİRLİĞİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Hakan ADA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKİM 2006
ANKARA**

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hakan ADA

Hakan ADA tarafından hazırlanan PETROL VE DOĞALGAZ BORU HATLARI İÇİN ÜRETİLEN BORULARIN TOZALTI VE SPİRAL KAYNAK YÖNTEMİYLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Süleyman TEKELİ

Üye : Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA

Üye : Doç. Dr. Halil ARIK

Tarih : 19 Eylül 2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

**PETROL VE DOĞALGAZ BORU HATLARI İÇİN ÜRETİLEN
BORULARIN TOZALTI VE SİRİRAL KAYNAK YÖNTEMİYLE
KAYNAKLANABİLİRLİĞİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**
(Yüksek Lisans Tezi)

Hakan ADA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2006**

ÖZET

Tozaltı kaynak yöntemiyle üretilen spiral dikişli çelik borular, petrol ve doğalgaz iletim hatlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak özellikle yüksek işletme basınçları altında, petrol ve doğalgaz hat borularının performansına yönelik kalite istemleri her geçen gün daha da artmaktadır. Kullanılan çelik malzemenin türü, malzeme kalınlığı, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri, kaynak telinin ve tozunun türü, ilave kaynak metali miktarı, kaynak hızı ve kaynak parametreleri petrol ve doğalgaz hat borularının performansını etkileyen önemli faktörlerdir. Sayılan bu faktörlerin tümü kaynak tasarım çalışmasının önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, öncelikle tozaltı kaynak yöntemiyle spiral dikişli boru üretimi için oldukça kapsamlı bir literatür çalışması yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda tozaltı kaynağı ile spiral dikişli olarak farklı malzemelerden petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların mekanik performansının incelenerek kaynaklı birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkilerinin araştırılması ve kullanılan malzemelerin birbiriyle

mukayesesi amaçlanmıştır. Deneyel çalışmalarda, API 5L standardında X65, X52, X70, X60 doğalgaz boruları ve farklı ebatlarda X65 petrol borularına kaynaklı birleştirme işlemleri uygulanmış ve bu birleştirmelere kimyasal analiz, sertlik, çekme, çentik - darbe, eğme testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikro fotoğrafları çekilerek incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kullanılan malzemeler içerisinde en verimli mekanik test sonuçları X70 malzemedен imal edilen doğalgaz borusunda elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 710.3.019
Anahtar Kelimeler : Tozaltı ark kaynağı
Sayfa Adedi : 157
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA

**WELDABILITY OF PIPES PRODUCED FOR CRUDE OIL AND
NATURAL GAS PIPELINES WITH THE METHOD OF SUBMERGED
AND SPIRAL ARC WELDING AND RESEARCHING THEIR
MECHANICAL PROPERTIES**

(M.Sc. Thesis)

Hakan ADA

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
October 2006**

ABSTRACT

Spiral pipes made of steel with the method of submerged arc welding are used quite extensively in the transmission line of crude oil and natural gas. However, especially under high pressures, the need for the quality in the performance of crude oil and natural gas pipelines is getting more and more significant. The kind of the steel material used, the wall thickness of the material, chemical composition of welding metal and its mechanical properties, the kind of welding wire and powder, the amount of additional welding metal, the speed and the parameters of the welding are the leading factors affecting the performance of the crude oil and natural gas pipeline. All of these factors emphasize the importance of the study on welding design.

In this study, primarily a fully comprehensive research on the production of spiral pipe with the method of submerged arc welding has been done. What is aimed at in the experimental studies is the examination of the mechanical performance of the pipes produced for the crude oil and natural gas pipelines

with the method of submerged arc welding and spiral pipe using different materials and effects of welded composition on microstructures and mechanical properties in addition to the comparison of materials used. In the experimental studies, X65, X52, X70, X60 natural gas pipeline in the standard of API 5L and X65 crude oil pipes in different sizes have been composed by welding and chemical analysis, hardness, tensile strength, charpy impact, bending tests have been made. Besides, macro and micro photographs of these welded compositions have been taken. As a result of experiments performed, the most productive mechanic test results among the materials used are obtained from natural gas pipe which is manufactured from X70 material.

Science Code : 710.3.019

Key Words : Submerged arc welding

Page Number: 157

Adviser : Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hem uygulamaya yarar getirmesi hem de üniversite – sanayi işbirliğinin gelişimine katkıda bulunması amacıyla bilgi ve tecrübeleriyle çalışmama ışık tutan ve değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren sayın hocam Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA’ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince göstermiş olduğu destek, teşvik ve anlayış için BOTAŞ Genel Müdürlüğü Satınalma Daire Başkanım sayın M. Semih YÜKSEK, Satınalma Daire Başkan Yardımcım ve kıymetli ağabeyim sayın Fahri KANDAZ, amirlerim sayın Y. Ziya ÖZÜK, H.Tahsin KESKİN, Fatih GÖKHAN, Tekin YILMAZ, İbrahim ŞEFTALİOĞLU ve İrfan PEKER’e; deneysel çalışma ve literatür çalışmalarında her türlü olanağından faydalandığım Borusan Mannesmann, Ümrân, Noksel, Emek ve Özmak Çelik Boru Fabrikalarının yönetici ve çalışanlarına, sonsuz şükranlarımı belirtmek isterim. Ayrıca bütün çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölüm Başkanı Prof. Dr. Adem KURT’a ve tüm öğretim elemanlarına, özellikle öğretim görevlisi sayın hocam Dr. Ahmet DURGUTLU’ya ve araştırma görevlisi sayın Tayfun FINDIK’a da teşekkürlerimi belirtmek isterim.

Tüm öğrenim hayatım boyunca beni her zaman destekleyerek benimle gurur duyan ve bugünlere getiren babam Bekir ADA ve annem Menşure ADA’ya, kardeşlerim Beyhan ERDOĞAN ve Emine KILIÇ’a, enişterim Ali ERDOĞAN ve İbrahim KILIÇ’a, kadim dostlarım Osman KEKLİK, Nihat KAYA, Şahin ŞERİFOĞULLARI, Yaşar AKSOY, Ali Osman ARSLAN, Nihat AKGÜN, Kamuran İÇTEN, Nejat KOLUKISA, İ.Erden GÜNAY, Murat DEĞİRMENCİ, Derya KANTAR, Betül SOYLU, Azize AÇIK, Kemal ŞAHİN, Zekeriya KÜÇÜK ve Oktay DEMİRBAŞ’a, tezimin yazımı ve basımı konusunda yardımları için Ebru ÖZDEMİR, Yağmur SERGEN, Nalan DURMUŞ, Enver ULUOCAK ve Emel KEPENKOĞLU’na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xvi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ	7
2.1.Yöntemin Tanımı.....	7
2.1.1. Tozaltı kaynağında arkın oluşumu.....	8
2.1.2. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak makineleri.....	10
2.1.3. Tozaltı kaynağında akım türü ve kutuplama.....	13
2.1.4. Tozaltı kaynağında ark üflemesi ve önlemesi.....	14
2.2. Tozaltı Kaynak Yönteminde Kullanılan Kaynak Parametreleri.....	14
2.2.1. Kaynak ağzı.....	15
2.2.2. Akım yoğunluğu.....	15
2.2.3. Kaynak akım şiddeti.....	17
2.2.4. Ark gerilimi.....	19
2.2.5. Kaynak hızı.....	20
2.2.6. Kaynak düzlemi ve elektrod açısı.....	25

Sayfa

2.2.7. Serbest tel uzunluğu ve elektrodlar arası uzaklık.....	27
2.3. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Sarf Malzemeleri.....	29
2.3.1. Kaynak tozları.....	29
2.3.2. Tozaltı kaynak telleri.....	40
2.4. Tozaltı Kaynağında Kaynak Metalurjisi.....	42
2.4.1. Kaynak bölgesinin içyapısı.....	44
2.4.2. Kaynak sırasında oluşan ısıl çevrimler.....	47
2.5. Tozaltı Kaynağında Oluşan Kaynak Hataları.....	58
2.5.1. Nüfuziyet yetersizliği.....	58
2.5.2. Yanma oluğu (çentik).....	59
2.5.3. Gözenek oluşumu.....	60
2.5.4. Kalıntılar.....	61
2.5.5. Çatlak oluşumu.....	63
2.5.6. Geometrik kaynak hataları.....	69
3. BORU HATTI ÇEŞİTLERİ VE BORU İMALATI.....	72
3.1. Boru Hattı Çeşitleri.....	72
3.3. Petrol ve Doğalgaz Hat Boruları.....	73
3.4. Az Karbonlu Alaşımsız Çelikler ve İnce Taneli Yapı Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği.....	77
3.3.1. Az karbonlu alaşımsız çelikler.....	77
3.3.2. Yüksek mukavemetli az alaşımlı (ince taneli) yapı çelikleri.....	86
3.3.3. Doğalgaz ve petrol boru hatlarında kullanılan çeliklerin özellikleri.....	91

Sayfa

4. TOZALTI KAYNAĞI İLE PETROL VE DOĞALGAZ İLETİM HAT BORUSU ÜRETİMİ.....	100
4.1. Spiral Dikişli Boru Üretim Yöntemi.....	100
4.2. Boyuna Dikişli Boru Üretim Yöntemi.....	107
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	110
5.1. Materyal ve Metod.....	110
5.1.1. Materyal.....	110
5.1.2. Metod.....	113
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	117
6.1. Deney Sonuçları.....	117
6.1.1. API 5 L X65 doğalgaz boru numunelerine ait deney sonuçları.....	117
6.1.2. API 5 L X52 doğalgaz boru numunelerine ait deney sonuçları.....	121
6.1.3. API 5 L X70 doğalgaz boru numunelerine ait deney sonuçları.....	126
6.1.4. API 5 L X60 doğalgaz boru numunelerine ait deney sonuçları.....	130
6.1.5. API 5 L X65 petrol boru numunelerine ait deney sonuçları.....	135
6.1.6. API 5 L X65 petrol boru numunelerine ait deney sonuçları.....	139
6.2. Deney Sonuçlarının Tartışılması.....	143
6.2.1. Makroyapı sonuçlarının tartışılması.....	143
6.2.2. Mikroyapı sonuçlarının tartışılması.....	144
6.2.3. Çekme deney sonuçlarının tartışılması.....	145
6.2.4. Sertlik deney sonuçlarının tartışılması.....	147
6.2.5. Çentik - darbe deney sonuçlarının tartışılması.....	149

	Sayfa
6.2.6. Eğme deney sonuçlarının tartışılması.....	151
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	152
7.1. Sonuçlar.....	152
7.2. Öneriler.....	153
KAYNAKLAR.....	154
ÖZGEÇMİŞ.....	157

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Tozaltı kaynağında kullanılan bazı kaynak ağız biçimleri	16
Çizelge 2.2. 3,2 mm tel çapı için kaynak akımına bağlı olarak ergime miktarı.....	19
Çizelge 2.3. Kaynak tozlarının bazikliğe göre sınıflandırılması.....	33
Çizelge 2.4. Kaynak tellerinde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri.....	41
Çizelge 2.5. Tozaltı kaynağında kaynak tellerinin çaplarına göre çalışabileceği akım şiddeti değerleri (ASM Handbook, 1983).....	41
Çizelge 2.6. EN 756'ya göre kaynak tellerinin kimyasal bileşimleri.....	41
Çizelge 2.7. C _{eq} (IIW) için çeliklerdeki alaşım elementlerinin üst sınırı.....	56
Çizelge 2.8. C _{eq} 'e göre ön tav sıcaklığının belirlenmesi.....	57
Çizelge 2.9. Ön tav uygulanmadan kaynak edilebilecek maksimum parça kalınlığı değerleri.....	57
Çizelge 3.1. API-5L'e göre çelik sınıflarına göre boru imalat metotları.....	75
Çizelge 3.2. API-5L'e göre dikişli ve dikişsiz boruların kimyasal analizi.....	76
Çizelge 3.3. API-5L'e göre boruların mekanik özellikleri.....	76
Çizelge 3.4. Çeliklerin alaşımlı sayılabilmesi için içerebilecekleri element miktarlarına ilişkin alt sınırlar (EURO-NORM, 20-74).....	79
Çizelge 3.5. Sweet-gaz boru hattında kullanılan X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi.....	92
Çizelge 3.6. Off-shore boru hattında kullanılan X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi.....	93
Çizelge 3.7. Off-shore boru hattında kullanılan X-65 çeliğin mekanik özellikleri.....	93
Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri.....	112
Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan S2Mo kaynak telinin kimyasal analizi.....	112

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.3. Deneylerde kullanılan S3Mo kaynak telinin kimyasal analizi.....	112
Çizelge 5.4. Deneylerde kullanılan P223 FX türü kaynak tozunun kimyasal analizi.....	112
Çizelge 5.5. Deney parametreleri.....	113
Çizelge 6.1. X65 malzeme kaynak metali kimyasal analizi (11,90 mm).....	117
Çizelge 6.2. X65 malzemeye ait çekme testi sonuçları (11,90 mm).....	120
Çizelge 6.3. X65 malzemeye ait çentik - darbe deney sonuçları(11,90 mm).....	121
Çizelge 6.4. X65 malzemeye ait eğme testi sonuçları (11,90 mm).....	121
Çizelge 6.5. X52 malzeme kaynak metalinin kimyasal analizi.....	122
Çizelge 6.6. X52 malzemeye ait çekme deneyi sonuçları.....	125
Çizelge 6.7. X52 malzemeye ait çentik - darbe deney sonuçları.....	126
Çizelge 6.8. X52 malzemeye ait eğme testi sonuçları.....	126
Çizelge 6.9. X70 malzeme kaynak metalinin kimyasal analizi.....	127
Çizelge 6.10. X70 malzemeye ait çekme testi sonuçları.....	129
Çizelge 6.11. X70 malzeme çentik - darbe deney sonuçları.....	130
Çizelge 6.12. X70 malzeme eğme testi sonuçları.....	130
Çizelge 6.13. X60 malzeme kaynak metalinin kimyasal analizi.....	131
Çizelge 6.14. X60 malzemeye ait çekme testi sonuçları.....	133
Çizelge 6.15. X60 malzemeye ait çentik - darbe deney sonuçları.....	134
Çizelge 6.16. X60 malzemeye ait eğme deneyi sonuçları.....	134
Çizelge 6.17. X65 malzeme kaynak metalinin kimyasal analizi (11,91 mm).....	135
Çizelge 6.18. X65 malzemeye ait çekme testi sonuçları (11,91 mm).....	137
Çizelge 6.19. X65 malzemeye ait çentik - darbe deney sonuçları (11,91 mm).....	138

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.20. X65 malzemeye ait eğme testi sonuçları (11,91 mm).....	139
Çizelge 6.21. X65 malzeme kaynak metalinin kimyasal analizi (14,27 mm).....	139
Çizelge 6.22. X65 malzemeye ait çekme testi sonuçları (14,27 mm).....	142
Çizelge 6.23. X65 malzemeye ait çentik - darbe deney sonuçları (14,27 mm).....	143
Çizelge 6.24. X65 malzemeye ait eğme deneyi sonuçları (14,27 mm).....	143

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Odundan yapılmış doğalgaz borusunun kesit resmi.....	1
Şekil 2.1. Tozaltı kaynak yönteminin şematik görünümü.....	8
Şekil 2.2. a) Düşey karakteristik (TIG kaynağı için) b) Yatay karakteristik (MIG/MAG kaynağı için).....	12
Şekil 2.3. Tozaltı kaynak yönteminde, kaynak ağzı ile dolgu miktarı arasındaki ilişki.....	16
Şekil 2.4. Tozaltı kaynağında ark geriliminin gösterimi.....	20
Şekil 2.5. Kaynak hızının kaynak banyo biçimi üzerindeki etkisi.....	21
Şekil 2.6. Tozaltı kaynağında kaynak akımı ve kaynak hızının ergime kesit alanı üzerindeki etkisi.....	23
Şekil 2.7. Kaynak akımı, kaynak hızı ve ergime kesit alanı arasındaki ilişki.....	23
Şekil 2.8. Kaynak akımı, kaynak hızı ve ark geriliminin nüfuziyet derinliğine etkisi.....	24
Şekil 2.9. Kaynak hızı, kaynak akımı ve yanma oluşu arasındaki ilişki.....	24
Şekil 2.10. Elektrot eğiminin kaynak dikiş biçimi üzerindeki etkisi.....	25
Şekil 2.11. Kaynak düzleminin kaynak biçimi üzerindeki etkisi.....	26
Şekil 2.12. Spiral dikişli boru üretiminde kaynak kafalarının yerleşimi.....	28
Şekil 2.13. EN 760 standardına göre kaynak tozlarının gösterimi.....	38
Şekil 2.14. EN 756 standardına göre kaynak tellerinin gösterimi.....	43
Şekil 2.15. Kaynak sırasında kaynak bölgesinde oluşan mikro yapısal değişimler..	44
Şekil 2.16. Ergime bölgesindeki tanelerin durumu.....	45
Şekil 2.17. a) Kaynak bölgesindeki ısınma ergisi b) ITAB bölgesindeki ısı yayılımı.....	49

Şekil	Sayfa
Şekil 2.18. a) Üç boyutlu ısı iletimi (kalın parça) b) İki boyutlu ısı iletimi (ince parça).....	53
Şekil 2.19. Kalınlık, ısı girdisi ve soğuma süresi arasındaki ilişki.....	55
Şekil 2.20. Nüfuziyet yetersizliği.....	59
Şekil 2.21. Yanma oluşu.....	60
Şekil 2.22. Gözenek türü kaynak hataları.....	62
Şekil 2.23. Kalıntı türü hatanın oluşumu.....	63
Şekil 2.24. Kalıntı türü kaynak hatasının görünümü.....	63
Şekil 2.25. Kaynak metalinde oluşan sıcak çatlak hatası.....	64
Şekil 2.26. Çentik vurma işinin sıcaklıkla değişimi.....	69
Şekil 2.27. İşlerlik ile dikiş kaçıklığı arasındaki ilişki.....	70
Şekil 3.1. Karbonun tokluk üzerindeki etkisi.....	80
Şekil 3.2. Tane küçülmesinin çelik özellikleri üzerindeki etkisi.....	87
Şekil 3.3. HSLA çeliği kaynak metalinin soğuma eğrisi.....	94
Şekil 3.4. Kaynak metalindeki azotun tokluk üzerindeki etkisi.....	95
Şekil 3.5. Kaynak metalinde iğnemsî ferrit (AF) oluşumu.....	96
Şekil 3.6. StE 460 çeliğinin kaynağında kalınlık ile enerji girdisi arasındaki ilişki.....	96
Şekil 3.7. C, Nb ve B'un ITAB bölgesi tokluk özelliklerine etkisi.....	97
Şekil 3.8. Titanyumun ITAB bölgesinin tokluk özelliklerine etkisi.....	99
Şekil 3.9. ITAB bölgesinin tokluk özellikleri üzerine Nb'un etkisi.....	99
Şekil 4.1. Spiral dikişli kaynak makinesi açısı ayarı.....	101
Şekil 4.2. Spiral dikişli boru makinesinde banda silindirik biçim verme.....	103

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Biçim (form) verme ünitesi (deve boynu).....	103
Şekil 4.4. Spiral dikişli boru üretiminde kaynak dikişinin oluşumu.....	104
Şekil 4.5. Spiral dikişli boru üretim makinesinin değişik aşamaları.....	106
Şekil 4.6. Spiral dikişli boru üretim makinesinin şematik gösterimi.....	108
Şekil 4.7. Boyuna dikişli borularda iç kaynağın oluşumu.....	108
Şekil 4.8. Dış kaynak istasyonu görünümü.....	109
Şekil 5.1. Sertlik numunelerinde seçilen sertlik ölçme bölgeleri.....	113
Şekil 6.1. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X65, 11,90).....	120
Şekil 6.2. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X52).....	125
Şekil 6.3. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X70).....	129
Şekil 6.4. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X60).....	134
Şekil 6.5 Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X65, 11,91 mm).....	138
Şekil 6.6. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X65, 14,27 mm).....	142

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Spiral dikişli boru üretim makinesinin değişik aşamaları.....	104
Resim 5.1. Spiral boru üretiminde kullanılan kaynak makinesi.....	111
Resim 5.2.a) Çekme deney numuneleri b) Çekme cihazı.....	114
Resim 5.3.a) Çentik - darbe numuneleri b) Çentik - darbe cihazı.....	115
Resim 5.4. Eğme deney görüntüleri.....	116
Resim 6.1. Kaynağın makro görüntüsü (X65, 11,90 mm).....	118
Resim 6.2. X65 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları.....	119
Resim 6.3. Kaynağın makro görüntüsü (X52).....	123
Resim 6.4. X52 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları.....	123
Resim 6.5. Kaynağın makro görüntüsü (X70).....	127
Resim 6.6. X70 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları.....	128
Resim 6.7. Kaynağın makro görüntüsü (X60).....	131
Resim 6.8. X60 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları.....	132
Resim 6.9. Kaynağın makro görüntüsü (X65, 11,91 mm).....	135
Resim 6.10. X65 numunesi mikroyapı fotoğrafları (11,91 mm).....	136
Resim 6.11. Kaynağın makro görüntüsü (X65, 14,27 mm).....	140
Resim 6.12. X65 numunesi mikroyapı fotoğrafları (14,27 mm).....	140
Resim 6.13. Ana malzemeden ve kaynaklı bölgeden alınmış çekme deneyi sonuçları.....	147
Resim 6.14. Eğme deneyi sonucunda numunelerin iki farklı açıdan görünüşü.....	151

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
I	Kaynak akımı
L	Serbest tel uzunluğu
d	Tel çapı
A	Ergime kesit alanı
S	Kaynak hızı
E	Ark gerilimi (voltaj)
P	Nüfuziyet derinliği
H_{net}	Net ısı girdisi
H_f	Ergime ısısı
C	Spesifik ısı
T_m	Ana metal ergime sıcaklığı
T_o	Ana metal başlangıç sıcaklığı
f₂	Ergime etkinlik sayısı
f₁	Ark verimi
T_p	Tepe sıcaklık derecesi
Y	Ergime sınırına uzaklık
t	Malzeme kalınlığı
F2, F3	Dikiş faktörü
T_{8/5}	Soğuma süresi
d_g	Geçiş kalınlığı
R_{c2}, R_{c3}	İki ve üç boyutlu ısı iletiminde soğuma hızı
T_c	Soğuma hızının hesaplandığı sıcaklık
C_{eş}	Karbon eşdeğeri
CE_{PLS}	Boru hattı çelikleri için karbon eşdeğeri

Simgeler	Açıklama
A_d	Toplam dolgu kesit alanı
A_1	Kaynak ağzı kesit alanı
A_2	Kaynak kepi kesit alanı
v	Kaynak hızı
E	Kaynak bölgesine yığılan tel miktarı
h	Kaynak kep yüksekliği
s	Kaynak genişliği
r	Daire parçası yarıçapı
η	Bağıl termik verimlilik
γ	Kaynak metali yoğunluğu
AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
MR	Tel ergime miktarı
MR_{DC+}	DC(+) akım türünde ergiyen tel miktarı
MR_{DC-}	DC(-) akım türünde ergiyen tel miktarı
MR_{AC}	AC akım türünde ergiyen tel miktarı
ΔT_G	Malzeme tokluk geçiş sıcaklığı
N	Nötr derecesi
Z	Herhangi bir bileşim
V_{sk}	Kritik soğuma hızı
λ	Çeliğin özgül ısısı
ρ	Çeliğin yoğunluğu
N_f	Nitrür oluşturmamış serbest azot
KN	Kilonewton

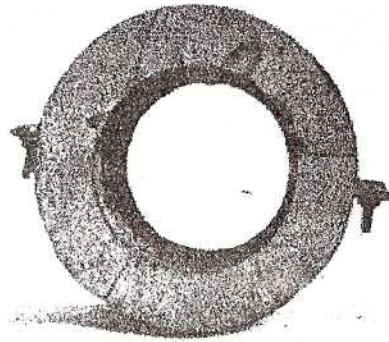
Kısaltmalar	Açıklama
LNG	Sıvılaştırılmış doğalgaz

Kısaltmalar	Açıklama
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
SAW	Tozaltı ark kaynağı
HV	Hardness Vickers
BOTAŞ	Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş.
BTC	Bakü – Tiflis - Ceyhan
HIC	Hydrogen Induced Cracking
HSLA	High strength low alloyed
MS	Mangan – silikat
CS	Kalsiyum – silikat
ZS	Zirkonyum – silikat
RS	Rutil – silikat
AR	Alumina – rutil
AB	Alumina – bazik
AS	Alumina – silikat
AF	Alumina- florit – bazik
FB	Florit – bazik
AWS	American Welding Society
EN	Euronorm
ITAB	Isının tesiri altındaki bölge
IIW	Uluslararası Kaynak Enstitüsü
NACE	The National Association of Corrosion Engineers
Af	Acicular Ferrite (iğnemsî ferrit)
B	Baziklik ölçęi
API	American Petroleum Institue
ASTM	American Society for Testing and Materials
IEO	International Energy Outlook

1. GİRİŞ

The International Energy Outlook (IEO)'nun, 1998 yılında yapmış olduğu bir araştırmada, dünya genelinde 2020 yılında 1970'de tüketilen enerjinin yaklaşık üç katının tüketileceği bildirilmektedir. Buna göre, petrol talebinin 1995 ile 2020 yılları arasında günde 45 milyon varilin üstüne çıkarak yıllık %2'lik ortalama bir hızla artacağı ve toplam enerji tüketiminde petrolün payının 2020 yılında %37 dolaylarında olacağı tahmin edilmektedir. Ulaşım dışındaki diğer tüm alanlarda petrolün en güçlü rakibi haline gelecek olan doğalgazın kullanımının ise 2020'de ikiye katlanarak 5 trilyon m³'e ulaşacağı ön görülmektedir[Petrogas,1999]. Böylesine hem ekonomik hem de stratejik önemi bulunan petrol ve doğalgazın bulundukları kaynaklardan çıkarılarak ayırma istasyonlarına, ayırma işleminden çıkan ürünlerinse kullanım yerlerine taşınmaları gereklidir. Yüksek basınçlarla gerçekleştirilen bu taşıma işlemi ise büyük çaplı çelik borular ile yapılmaktadır.

Boru hatları asırlar öncesinde yerleşim yerlerine, şehirlere ve köylere su taşıyordu. Gaz endüstrisi bir bölgeden diğer bir bölgeye doğalgazı nakletmek için ilk olarak odundan yapılmış bir boru kullandı. Bu borunun basınç sınıfı 500 inç su kolonuydu. Şekil 1.1'de odundan yapılmış doğalgaz borusunun kesit resmi görülmektedir.



Şekil 1.1. Odundan yapılmış doğalgaz borusunun kesit resmi

Gelişmiş boru hattı sistemleri dünyanın her yerinde üretim alanlarından tüketicilere, petrol, petrol ürünleri ve doğalgaz taşımaktadır. Uzak mesafelere petrol ve gaz

ürünlerini taşımak için faydalanabilecek en kolay ve en ucuz yolun boru hatlarını kullanmak olduğu herkes tarafından bilinmektedir. Bugün kullanılan doğalgaz ve petrol boru hatlarının tarihi, ekonomik değeri olan ilk petrol kuyusunun 1859 yılında Pensilvanya’da açılmasından sonra başlamıştır. Bundan dolayı, 1859 yılından bu yana, gaz ve petrolün keşfedilmesine ve pazarın büyüdüğü yere bağlı olarak binlerce kilometrelik boru hattı döşenmektedir. Dünyada enerjiye olan ihtiyacın artması da yüksek taşıma kapasitesine sahip yüksek basınçlı boru hatlarının inşasını gerektirmektedir. 109 mil uzunluk ve 6 inç çapa sahip ilk şehirlerarası petrol boru hattı 1879 yılında Pensilvanya’da Bradford ile Allentown arasına döşenmiştir. 1886 yılında 87 mil uzunluk ve 8 inç çapa sahip doğalgaz boru hattı Pensilvanya - Kane ile Newyork - Buffalo arasında inşa edilmiştir. 1890’lı yılların başlarında boru hattı inşası gittikçe büyümeye başlamıştı. 1906 yılında kıvılcıklı bölgesi olan Oklahama ile Teksas arasına döşenmiş 472 mil uzunluğuna 8 inç çapa sahip boru hattı zamanın teknolojisine meydan okumaktaydı. İlk boru hatları vidalı borular kullanılarak inşa ediliyordu. İşçiler büyük maşalar yardımıyla bu boruları birbirine vidalıyordu. Yaklaşık olarak 1920’li yıllara kadar iki ayrı borunun birbirine kaynaklanması kabul edilir bir birleştirme yöntemi değildi. Oksiasetlenen kaynağı 1920’li yıllarda ilk kez ortaya çıktı fakat 1920’li yılların sonunda bunun yerini elektrik kaynağı aldı. O zamandan günümüze kadar neredeyse tüm petrol ve doğalgaz boru hatları kaynak işlemi ile birleştirilmektedir. Kaynak teknolojisi yeni boru çeliklerine olan talebe ayak uydurmaktadır. Boru hatlarının uzunluğunun ve boru çaplarının artması kaynak teknolojisine olan ihtiyacı arttırmaktadır.

İkinci Dünya Savaşı esnasında tankerlerle petrol taşıma işleminin kesintiye uğramasından dolayı Amerika Birleşik Devletleri’nde petrolün uzak mesafelere boru hatlarıyla taşınmasında ciddi bir patlama meydana gelmişti. Amerika’nın güneybatısındaki kıyılardan doğu kıyılarına petrolün taşınması gerekiyordu, bunun için iki boru hattı inşa edildi. Bunlardan birincisi 1250 mil uzunluğunda 24 inç çapındaki ham petrol taşıma hattı, ikincisi ise 1470 mil uzunluğunda 20 inç çapındaki petrol ürünlerini taşıma hattı idi. Aynı zamanlarda, hükümetin sahip olduğu boru hatları inşa edildi. Tennessee Gaz Şirketi güneybatı ile doğu kıyıları

arasındaki 1265 mil uzunluğuna sahip 24 inç çapındaki doğalgaz boru hattını hükümet için döşedi. 1947 yılında Teksas Eastern hükümetin boru hattını satın aldı ve elektrik motorlarını santrifüj kompresörlere bağlayarak petrol boru hattını doğalgaz boru hattına dönüştürdü.

1950’li yıllarda dünyanın diğer bölgelerinde de boru hattı ağları geliyordu. Yirminci yüzyılın başlarında Rusya’da petrolün bulunması dünya pazarında çok önemli rol oynadı. Yirminci yüzyılın ortalarında Sibiry’a da çok büyük oranda petrol bulundu ve Sovyetler Birliğinde çok uzak mesafeler boyunca çok çetin arazilerden petrol boru hatları döşendi. 1960’lı yıllarda Sovyetler Birliği doğalgaz boru hattı sistemi kurmaya başladı. Bu sistem 1990’lı yılların başlarında 126.000 mil uzunluğunda 40–55 inç arasında değişen çapa sahip ana hattan oluşmaktaydı. 1950’li yılların başlarında büyük boru hatları Kanada’da döşenmeye başladı. Aynı zamanlarda, Trans Arabian boru hattı inşa edildi. Petrolün, doğalgazın ve diğer ürünlerin müşteriye ulaştırılmasında en verimli ve en ekonomik yolun boru hatları ile taşımacılık olduğunun anlaşılmasıyla birlikte dünya boru hattı ağlarında ciddi bir yükselme meydana gelmeye başladı. Bugün dünyada her yıl kilometrelerce boru hattı inşa edilmektedir. İnşa edilen boru hattının miktarı petrol ve doğalgazın bulunmasına, bunların yerlerine ve pazarın büyüdüğü yere bağlıdır.

Günümüzde üretilen hat borularının çoğu API (American Petroleum Institute) standardına göre üretilmektedir. Kalifiye edilmiş üreticiler sattıkları boru üzerinde API kısaltmasını kullanma hakkına sahiptirler. Hat borularının imalatında kullanılan ana standart API Spec 5L dir. Bu standart dikişsiz ve boyuna dikişli boruları kapsamaktadır. API Spec 5L Grade A, B, X kalite gruplarını ihtiva etmektedir ve daha önceleri ayrı yayınlar olan Spec 5LS ve 5LX, API Spec 5L’ye dahil edilmiştir. Tüm API hat boruları psi olarak verilen minimum akma mukavemetleri ile gösterilirler. Hat boruları imalatında uygulanan yöntemlere göre dikişli ve dikişsiz olmak üzere iki şekilde üretilirler. Dikişsiz borular şekillendirilebilen çeliklerden kaynak dikişi yapılmadan imal edilen borulardır. Bu borular çeliklerin sıcak işlenmesi ile imal edilir. Dikişli boru imalatında birçok farklı imalat yöntemi

mevcuttur. Bu yöntemler boru üzerindeki boyuna dikişin sayısına ve kullanılan kaynak ekipmanına bağlı olarak farklılık gösterir. Dikişli borulara örnek olarak, elektrik kaynaklı, tozaltı kaynaklı, gaz metal ark kaynaklı, çift dikişli, spiral dikişli borular verilebilir[Yıldız,2000].

Enerji maliyetinin önemli bir oranda nakil maliyetine bağlı olması, boru hatlarında aynı çaplarda daha fazla gaz akışı sağlanması gereksinimini ortaya çıkarmakta bu da ancak, daha yüksek basınçlara çıkılması ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle, daha yüksek basınç, daha fazla gaz akışı yani daha ekonomik gaz nakli anlamına gelmektedir. Ekonomik nedenlerden dolayı, yüksek basınçlarda çalışma ihtiyacı ise beraberinde borunun mukavemeti ve/veya kalınlığındaki artışları da kaçınılmaz hale getirmektedir. Aynı zamanda, hattın güvenliği açısından gerek boru gövdesinde gerekse kaynak dikişinde özellikle düşük sıcaklıklarda oldukça yüksek tokluk özellikleri istenmektedir. Yüksek basınçlarda hattın dayanıklılığı sadece borunun et kalınlığına ve malzemenin yapısına değil, aynı zamanda kaynak dikişinin kalitesine de bağlıdır.

Hat borusu olarak seçilecek malzemelerin fabrikasyonu çok önemlidir. Hat borusu olarak kullanılacak malzemenin eğilebilme veya şekillendirilebilme kabiliyeti kaynağa uygunluğu, ısıtılmasının kolaylığı, nihai mikroyapısının üniform ve stabil olması çok önemlidir. Hat borusu için malzeme seçimi yapılırken servis ile ilgili standardın ön gördüğü şartları sağlayan en ekonomik malzeme seçilmelidir.

İnce kesitlerde yüksek mukavemet özelliklerine sahip olan ve kaynak edilebilirliği oldukça iyi olan ince taneli yapı çelikleri, gaz ve petrol iletim hatlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle %0,09 C ve %1,6'ya kadar Mn içeren, çoğunlukla Nb ve gerekiyorsa Ti ya da V eklenmesiyle alaşımlandırılan ve karbon eşdeğeri IIW 'ye göre 0,32'ye kadar çıkabilen bu çeliklerin -20 °C'de tokluk değerleri 200 J düzeyindedir. Öte yandan, servis sırasında boru hattının kısa süreli de olsa korozyon niteliğindeki gaz ya da ham petrol nakli için kullanımı söz konusu ise, HIC (Hydrogen Induced Cracking) testleri gerek çelik gerekse boru üreticileri için

önemli bir kabul koşulu haline gelmektedir. Bu amaçla kullanılan çelikler, tokluk özelliği yüksek, sertleşebilme özelliği düşük ve HIC dayanımı oldukça fazla olan çeliklerdir. Termomekanik haddeleme yöntemi ile elde edilen bu tür çelikler kalıntı ve çökeltilerden arındırılmış, oldukça düşük miktarda karbon ($<0,05\%$), mangan ve kükürt içeriğine sahiptirler.

Gaz ve petrol iletim hatlarında, çoğunlukla tozaltı kaynak yöntemi ile üretilen spiral veya düz dikişli borular kullanılmaktadır. Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretimi bandın şekillendirme, kaynak, ultrasonik test ve boy kesme işlemlerinin yapıldığı kaynak makinesi ile başlayıp hidrostatik test ve X-Ray gibi bir dizi kontrol işlemiyle devam eder. Spiral kaynaklı boru üreten makinelerde ana prensip, tahrik silindirleri tarafından itilen saç malzemeye şekillendirme makaraları yardımı ile spiral bir hareketin yaptırılmasıdır. Spiral dikişli boru kaynağının ilk aşaması boruya spiral şekil verilen bu bölgede yapılan iç kaynaktır. Dış kaynak ise, iç kaynaktan ayrı olarak daha ileri bir aşamada yapılır. Kaynak işleminde, birden fazla kafa kullanımı ile kaynak banyosuna daha fazla akım iletimi sağlanarak kaynak hızı artırılabilir.

Yüksek basınçlara güvenle cevap verilebilecek kalite seviyesinin yakalanabilmesi için kaynak tekniğinin iyi bilinmesi ve buna bağlı olarak kaynak parametreleri seçiminin doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Ülkemizde boru fabrikalarında, kaynak parametreleri ile malzemenin mekanik-kimyasal özellikleri ve kaynak dikişinde istenilen performans özellikleri (sertlik ve tokluk gibi) arasında bir ilişkinin kurulamadığı, kaynak parametrelerinin çoğu zaman deneme yanılma yöntemi ile saptandığı görülmektedir. Kaynak tekniğinin yeterince bilinmemesi kalite kontrol işlemlerinde alışılmışın dışına çıkılmasını engelleyerek, ya gereksiz yönde fire verilmesine ya da belirli hataların farkına varılmamasına yol açmaktadır. Benzeri nedenlerden dolayı, kaynak güvenilirliği kaynak hızının düşük tutulması ile sağlanmaya çalışılmakta, bu ise hem verimliliğin düşmesine hem de maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Buradaki temel eksiklik, kaynak parametrelerinin seçimine yönelik bir yöntemin oluşturulamamasıdır.

Coğrafi konumu nedeni ile ülkemiz, zengin enerji kaynaklarına sahip doğu ülkeleri ile bu enerjiye ihtiyaç duyulan batı ülkeleri arasında “enerji köprüsü” olarak yeni bir yer kazanmaktadır. Ulusal basınımızda zaman zaman “bin yılın projesi” olarak adlandırılan Bakü-Tiflis-Ceyhan (BTC) boru hattının ülkemiz toprakları içinden geçmesi, Türkiye’nin sahip olduğu bu avantajlı konumun en somut göstergelerinden birisidir. Ülkemiz sadece gaz boru hatlarının geçiş yeri olmayıp, aynı zamandan yıllık 600.000 ton toplam kurulu kapasitesi ile uluslararası standartlara uygun olarak spiral dikişli gaz borusu üretimini de gerçekleştirmektedir [Şirin, 2004].

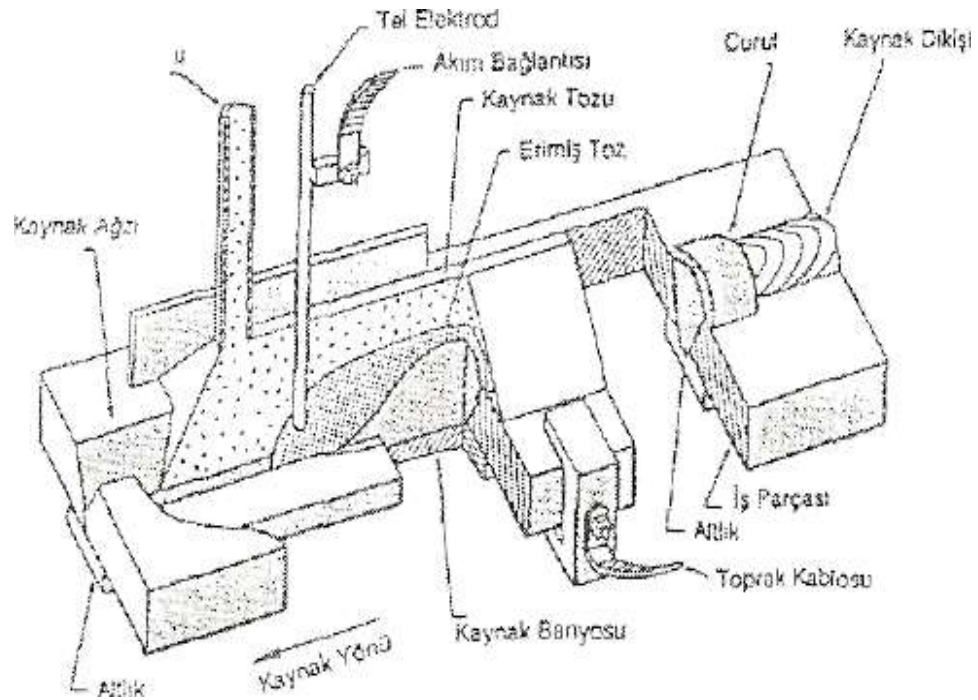
Bu çalışmada; petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanılan farklı malzemelerin mekanik performansı incelenerek kaynaklı birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, tozaltı kaynağı ile spiral dikişli olarak API 5L standardında X65, X52, X70, X60 doğalgaz boruları ve farklı ebatlarda X65 petrol borularına kaynaklı birleştirme işlemleri yapılmış ve bu birleştirmelere kimyasal analiz, sertlik, akma, çekme, çentik - darbe, eğme testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikro fotoğrafları çekilerek incelenmiş, mekanik testler ve mikroyapı incelemeleri yardımı ile birleştirilen malzemelerin birbiri ile mukayesesi yapılmıştır.

2. TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ

2.1. Yöntemin Tanımı

Metalik bir malzemeyi ısı veya basınç ya da her ikisini birden kullanarak ve aynı türden ergime aralığına sahip bir malzeme ekleyerek veya eklemeyerek yapılan birleştirme işlemine “metal kaynağı”, malzemeyi sadece sıcaklığın etkisi ile bölgesel olarak ergitip, bir ek kaynak metali kullanarak (ya da kullanmayarak) birleştirme işlemine “ergitme kaynağı” denilir. Kaynaklı bağlantı için gerekli olan ısının elektrotlar ve iş parçası arasında oluşturulduğu ve ark yardımıyla sağlandığı ergitme kaynak türüne ise “elektrik ark kaynağı” denir. Elektrik ark kaynağı, iki kutup arasında oluşan arkın ısı kaynağı olarak esas ve ek kaynak metali ergitmesi şeklinde de tanımlanabilir. [Anık ve diğ., 1991a]. Kaynak işlemleri, havaya açık kaynak yöntemleri ile yapılabildiği gibi kaynak edilecek parçalardaki ağızlı örtücek katı maddelerin karışımı altında da yapılabilir (tozaltı kaynağı). Tozaltı kaynak yönteminde; ark, kaynak ağzına bir kanaldan sürekli olarak gönderilen bir toz altında kaynak bölgesine otomatik olarak sevk edilen bir tel elektrot ile iş parçası arasında yanar (Şekil 2.1). Ark bir toz örtüsü altında kaldığında etrafa ışıyım yapmaz ve ark enerjisinin büyük bir kısmı kaynak için sarf edilmiş olur[Şirin, 2004].

Toz örtüsü aynı zamanda, kaynak banyosunu atmosferin olumsuz etkilerine karşı korur. Tozun içindeki dezoksidanlar ve alaşım elementleri, kaynak bağlantısında arzu edilen mekanik özellikleri sağlamaktadır. Ayrıca, ark tozun içinde kaldığından kaynak sıçramalarının önüne geçilir ve böylece tel elektrot sarfıyatı da azaltılmış olur. Tozaltı kaynak yönteminde; kaynak akımı, kaynak teline özel bir bakır temas memesi ile verildiğinde çok yüksek akım şiddetlerine çıkılır. Yüksek akım şiddeti ise büyük bir kaynak banyosu elde edilmesine ve derin nüfuziyete imkân sağlar. Bu nedenle, tozaltı kaynağında derin bir kaynak ağzı hazırlamadan, hatta bazı durumlarda hiç kaynak ağzı açmadan kaynak yapma olanağı vardır.



Şekil 2.1. Tozaltı kaynak yönteminin şematik görünümü .

2.1.1. Tozaltı kaynağında arkın oluşumu

Kızgın bir katottan yayılan elektronların yüksek bir hızla anodu bombardıman etmesi sonucunda oluşan ark, hem ek kaynak metalinin (elektrot) hem de arkın karşısındaki bölgede esas metalin ergimesini ve ek kaynak metalinin esas metal üzerine geçmesini sağlar. Buna göre, parça ile elektrot arasında temas olmadığı sürece akım geçmez. Diğer bir deyişle, devre açıktır. Parça ile elektrot birbirine temas ettiğinde devre “kapanır” ve kısa devre akımı denilen bir akım geçmesi sağlanır. Bu kısa devre akımı bütün devrenin ısınmasına yol açar. Ancak, bu ısınma özellikle akım geçişine direncin en yüksek olduğu bölgelerde yani temasın iyi olmadığı elektrot ucunda toplanır ve bu uç ısınarak kızarmaya başlar.

Burada, “iyonlaşma” adı verilen elektro-kimyasal olay ile bu noktanın hemen civarındaki havayı elektriksel açıdan iletken kılan metalik buharlar oluşur. Elektrodun parçadan birkaç milimetre geriye çekilmesi durumunda, akım birinden

diğerine yani elektrottan parçaya iletken hale gelmiş hava üzerinden geçer ve ark oluşur. Oluşan ark kendisini ışık ve ısı biçiminde belli eder. Daha sonra elektrodun ucu damlacıklar halinde ergir ve oluşan damlacıklar ark tarafından ısınmış olan iş parçasındaki bölgeye geçer. Arkın temas ettiği noktada, parça yüzeyinde yerel olarak bir ergimiş metal banyosu oluşur, yani kaynak ile birleştirme oluşur[Oğuz, 1975]. Ark yardımıyla ergiyen elektrot metalin kaynak banyosuna geçişi üç farklı şekilde olur; spreyci halinde geçiş ki, burada metal damlaları arkın içinden ince damlalar halinde geçer. Küresel geçiş; iri damlalar şeklinde olup geçiş hızı öncekine göre daha yavaştır. Kısa devreli geçişte ise; elektrot ucundan kopan damla iş parçasına değeri ve kısa devre oluşturur daha sonra koparak ergimiş banyoya geçer.

Kaliteli bir kaynak dikiş i için, kaynak süresince sabit güçte (diğer bir değ işle, sabit akım ve gerilim değ erlerinde) kararlı olarak bir arkın bulunması gerekir. Bunun için, akım üretici (kaynak makinesi) ile kaynak arkının uyum içinde olmaları gereklidir. Zira kaynak iş leminde kaynak makinesi ile kaynak arkı ortak bir elektriksel çevrimde bulunurlar ve kaynak iş lemini birlikte gerçekleştirirler. Dolayısıyla, kaynak iş leminde harcanan enerji açısından kaynak makinesi üretici (arz eden), kaynak arkı ise tüketici (talep eden) durumundadır. İyi bir kaynak dikiş i için, yani; kararlı bir ark için kaynak iş lemi süresince enerji üreticisi ile tüketicisi arasında bir arz-talep dengesi demek, bunların ortak bir noktada çalışması demektir. Kaynak iş lemi sadece bu ortak noktada gerçekleş ir [Karadeniz ve Günay 1999].

Kaynak makinelerinde, makineyi karakterize eden ve makinenin gerilim-akım arasındaki bağı ntısını veren eğ riler mevcut olup, bu eğ rilere statik ve karakteristik eğ rileri adı verilir. Aynı şekilde, arkı karakterize eden ve ark gerilimi ile akım arasındaki bağı ntıyı veren ark statik karakteristiğ i vardır. Söz konusu ortak çalışma noktası, kaynak makinesi ile arkın statik karakteristiklerinin kesim noktasıdır. Kaynak iş leminin özelliğ i nedeni ile özellikle damla geç iş i sırasında ark boyu sürekli olarak değ iş ir ve bu nedenle kaynak iş lemi boyunca ortak noktada sürekli olarak çalış ılamaz. Ark boyu, ideal ark boyu çevresinde belirli bir bölge içinde değ iş tiğ i sürece ark çalışma noktası civarında kararlı olarak yanar ve sönmez. Arkın

kararlı olarak yandığı bu bölgeye ark karakteristikleri bölgesi adı verilir. Eğer bu bölge dışına çıkılırsa ark söner ve kaynak kesintiye uğrar. Kaynak işlemi boyunca, adı geçen bu ortak çalışma noktası ve yakın çevresindeki çalışma ne kadar fazla ise kaynak dikişi de o kadar kaliteli ve ekonomik olur. Bu ise doğrudan kullanılan kaynak makinesinin özellikleri ile ilgilidir.

2.1.2. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak makineleri

Elektrik ark kaynağını hem doğru akım hem de alternatif akım ile yapabilme olanağı bulunduğu için, kaynak makineleri de DC akım üretici (jeneratör ve redresör) ve AC akım üretici (transformatör) olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Kaynak jeneratörleri, bir kuvvet makinesi (benzin-dizel-elektrik motoru) tarafından hareket ettirilerek kaynak için gerekli elektrik akımını üretirler ancak, verimleri düşüktür. Kaynak redresörlerinin verimi ise jeneratörlere kıyasla daha yüksek olup (% 55–70), boşa çalışma tüketimleri oldukça azdır. Şebeke akımını kaynak akımına çeviren kaynak transformatörlerinin (kaynak trafosu) verimleri ise oldukça yüksek olup (% 95–75), boşa çalışma gerilimleri yüksektir [Anık ve Tülbentçi 1989]. Her kaynak yöntemi kendisine has karakterde bir kaynak makinesi gerektirir. Bu nedenle, kaynak yöntemlerine uygun karakterde bir kaynak makinesi seçilmelidir [Tülbentçi ve Kaluç 1997a]. Elektrik ark kaynağında kullanılan akım üreteçlerinin işlevleri, kaynak arkı için gerekli olan elektrik enerjisini sağlamaktadır. Genel olarak, yüksek gerilim ve düşük akım şiddetindeki şebeke akımını, düşük gerilim ve yüksek gerilim şiddetindeki kaynak akımına çeviren bu cihazlar aşağıda belirtilen donanım ve özelliklere sahip olmalıdır:

1. Şebeke tarafından besleniyorsa, şebeke gerilimini sınırlandırılmış boşa çalışma gerilimine çevirebilmelidir.
2. Kaynak akım şiddeti ayar donanımına sahip olabilme ve çalışma sırasında ayarlanmış kaynak akım şiddetini sabit tutabilmelidir.
3. Boşa çalışma gerilimi ayarına sahip olabilmelidir.

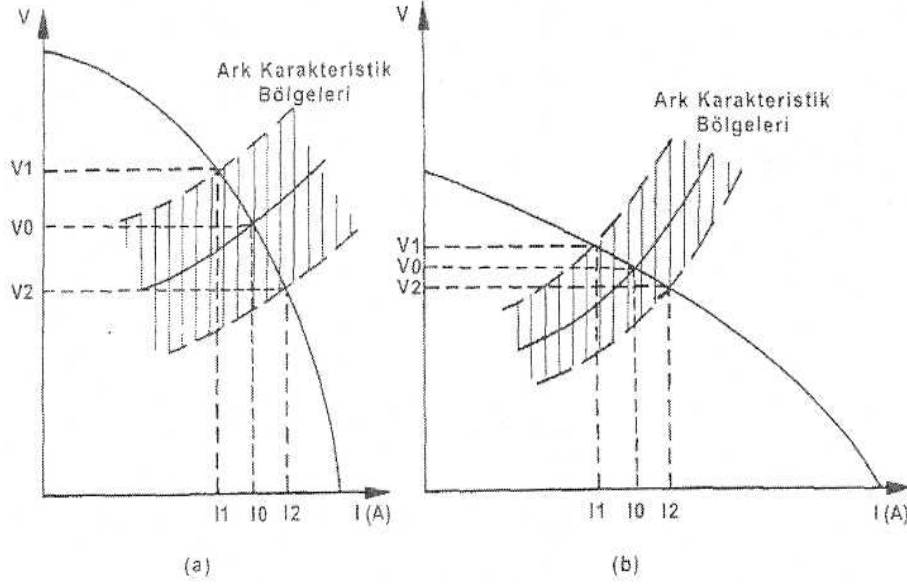
4. Çalışma başladığında meydana gelince boşta çalışma gerilimini olabilen en kısa zamanda dilimi içinde ark gerilimine düşürebilmelidir.
5. Çalışma anında kararlı bir ark oluşturulmalı ve bunun sürekliliğini sağlamalıdır.

Yukarıda belirlenen bu özelliklerin gerçekleşmesinden akım üreticinin statik ve dinamik karakteristikleri sorumludur. Söz konusu bu elektriksel karakteristikler, makinenin seçilmiş kaynak yöntemi için uygunluğunun en önemli göstergeleridir. Statik karakteristik, statik çalışmada yani sürekli ark durumunda makinenin akım şiddeti ile gerilimi arasındaki bağıntıyı yani gerilime bağlı olarak akımdaki değişmeyi verir. Dinamik karakteristik ise, çalışma sırasındaki ani yük değişimlerine karşı makinenin davranışdır. Diğer bir deyişle, akım ile gerilimin kısa zaman aralığındaki değişimini ifade eden karakteristiklerdir.

Sabit akım prensibine göre çalışan, düşey karakteristikli akım üreticilerinde ark geriliminin önemli bir büyüklükte düşmesine karşın akım şiddetindeki değişim çok azdır (Şekil 2.2-a). Bu nedenle, ark boyunda bir değişim olduğu zaman ergime gücündeki değişim çok azdır ve bu da düzgün bir kaynak dikişinin elde edilmesi için önemli bir üstünlüktür. Sabit akımlı üreticiler, hem AC hem de DC türü akım üretebilme yeteneğine sahiptirler. Sabit akımlı güç üretici kullanıldığında, otomatik bir gerilim algılama kontrol sistemine gerek vardır. Bu da ancak, gerilim duyarlı (değişken hızlı) tel sürme kontrol sistemi ile mümkündür.. Bu kontrol sistemi ile ark gerilimindeki değişimler sürekli olarak algılanır ve ark boyunu sabit tutabilmek için tel sürme hızı sürekli olarak değiştirilir. Yani, ark boyunu sabit tutabilmek için tel hızı sürekli olarak ayarlanır. Eğer, gerilim değeri ayar değerinin üstüne çıkarsa tel hızı artırılmakta, gerilim değeri ayar değerinin altına düşerse tel hızı azaltılmaktadır. Gerilim duyarlı tel sürme sistemleri akım yoğunluğunun 59 A/mm²'den daha az olduğu kaynak uygulamalarında başarılı sonuçlar vermektedir.

Sistemin ayar hızı, ince tellerin kullanıldığı yani, yüksek tel ilerleme hızının söz konusu olduğu kaynak uygulamalarında, kararlı bir ark oluşturmak için yetersiz kalmaktadır. Genellikle, 2,5 mm'den daha kalın çaplı tel kullanımının söz konusu

olduğu otomatik kaynak sistemleri ve tozaltı kaynak yönteminde oldukça uygun sonuçlar vermektedir[ASM Handbook Committee, 1983].



Şekil 2.2.a) Düşey karakteristik (örtülü elektrot ile ark kaynağı TIG kaynağı için)
b) Yatay karakteristik (MIG/MAG kaynağı) [Tülbentçi ve Kaluç, 1997a]

Yatay karakteristikli akım üreteçlerinde (sabit gerilimli) kaynak makinesinin verebileceği minimum ve maksimum akım şiddetleri ile sınırlandırılmış bir çalışma bölgesi bulunur ve bölgeye akım ayar alanı adı verilir. Yatay karakteristikli kaynak akım üreteçlerinde ark geriliminin (ark boyunun) az bir miktarda değişmesine karşın akım şiddetindeki yani ergime gücündeki değişim çok daha fazladır. (Şekil 2.2-b). Sadece, DC akım üretebilen sabit gerilimli güç üniteleri, sabit hızlı tel sürme sistemleri ile birlikte kullanıldığında, kaynak işlemi boyunca gerilimin hemen hemen sabit kalmasını sağlarlar. Burada, güç kaynağı akım ne olursa olsun seçilmiş olan ark gerilimine göre çalışır. Tel sürme motoru seçilmiş sabit bir devirde döner yani tel hızı sabittir. Ark boyundaki değişimler kaynak akımının artırma ve azalma gibi ani değişimleri ile dengelenir [Şirin, 2001]. Normal kaynak şartları sırasında herhangi bir nedenle ark boyunun uzaması sonucunda, akım şiddeti ve buna bağlı olarak tel ergime miktarı belirli bir oranda azalır. Ancak, tel sürme sabit hızla devam ettiği için telin ucu iş parçasına doğru ilk ark uzunluğunu elde edinceye kadar yaklaşır. Sonuç olarak, ark normal boyuna dönerken serbest tel uzunluğu artar

ve akım şiddeti belirli bir oranda azalır. Ark boyunun kısılması durumunda ise bunun tam tersi olur. Akım yoğunluğunun 59 A/mm^2 'den daha fazla olduğu ince çaplı ve yüksek hızlı tel kullanımının söz konusu olduğu kaynak yöntemlerinde, yüksek hızlı akım değişimleri için yatay karakteristikli güç kaynağı kullanımı zorunludur.

2.1.3. Tozaltı kaynağında akım türü ve kutuplama

Tozaltı kaynağında hem doğru akım (DC) hem de alternatif akım (AC) kullanılmakta olup, DC akımda negatif ya da pozitif kutuplama yapma imkânı vardır. DC (+) kutuplama da yüksek nüfuziyet elde edilirken, yüksek kaynak hızlarında çalışma olanağı da doğar. Ayrıca, gözenek oluşumuna karşı direnç yükselir. DC (-) kutuplama da ise ergime gücü artarken (%30) nüfuziyet azalır. Alternatif akımla kaynakta tutuşma özelliği iyi değildir, buna karşın ark üflemesi yoktur, ark daha sakin yanar. Dolayısı ile, yanma oluğu tehlikesi azalır. Birden fazla kaynak kafası kullanımında birbirine yakın birden fazla arkın üflemesi problemi, ilk ark oluşumunun DC diğerlerinin AC olarak seçilmesi ile ortadan kaldırılabilir. İlk ark oluşumunda nüfuziyet ana etken olduğu için yüksek akım şiddeti ve dolayısıyla büyük çaplı kaynak teli kullanılır. İkinci ve üçüncü ark oluşumlarında akım şiddeti, kaynak dikiş biçimi ve yapısına göre ayarlanır, tel çapları ise ilk kafadaki tel çapından daha küçük seçilir.

Endüstride maliyetlerin düşürülmesinin ön plana çıkması ile tozaltı kaynağında birden fazla kafa kullanımı ön plana çıkmıştır. Çift kafa (tandem) ya da üç kafa kullanımı ile, kaynak banyosuna daha fazla akım iletebilme olanağı vardır. Böylelikle, ergime hızı ve buna bağlı olarak kaynak hızı artırılabilir. Derin bir nüfuziyetin sağlanması için birinci kafada doğru akım tercih edilirken, kaynak metalinde iyi bir dolgu sağlanması için diğer kafalarda alternatif akım kullanılır. Ark üflemesinin kontrol altında tutulmasının zorunlu olduğu hallerde AC akım türü tercih edilir [Şirin, 2004].

2.1.4. Tozaltı kaynağında ark üfleme ve önleme

Bir telden elektrik akımı geçtiği zaman etrafında manyetik bir kuvvet alanı oluşur. Bir elektrik arkı da hareket halinde bulunan bir iletken olduğu için arkın çevresinde de bir manyetik alan oluşur. Kaynak sırasında, çeşitli nedenlerden dolayı arkın çevresini saran bu manyetik alanın dengelenememesi nedeni ile ark üfleme yarattığı bazı olumsuzluklar vardır, bunlar kısaca şöyle özetlenebilir:

1. Kaynak dikişi düzgün oluşamaz, ileriye doğru üflemede kaynak kepi düzleşir ve dikiş geometrisinde bozulmalar meydana gelir. Kaynak yönünün tersine doğru olan geriye üflemede ise, dikiş daralması ve gözenek oluşumu ile karşılaşılır.
2. Cüruf metal altında kalır.
3. Sıçramalar ve kaynak kenarında yanma olukları oluşur.
4. Nüfuziyet eksikliği ve buna bağlı olarak problemli bir kaynak işlemi oluşur.

Ark üfleme engellenmesi için; kaynak teline uygun bir eğim verilir, kısa ark boyu ile çalışılır (gerilim düşürülür), ince çaplı tellerdeki ark boyu kısa olduğu için olabildiğince ince çaplı tel kullanımına gidilir, uzun kaynak kablolarının oluşturduğu kıvrımlardan kaçınılır. DC yerine imkân varsa AC akım türü seçilir, kaynak hızı ve buna bağlı olarak akım şiddeti düşürülür[Şirin, 2001].

2.2. Tozaltı Kaynak Yönteminde Kullanılan Kaynak Parametreleri

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak parametreleri, kaynak işleminin ve elde edilen kaynak bağlantısının kalitesini belirleyen en önemli etkenler olup, kaynak edilen metalin türü ve parça geometrisi göz önüne alınarak saptanırlar. Burada, kaynak akımı, ark gerilimi, kaynak hızı ve kaynak ağzı biçimi temel kaynak parametreleridir. Bunun yanı sıra, kullanılan akım türü ve kutuplama, kullanılan tel çapları, toz yığılma yüksekliği, serbest tel uzunluğu, kaynak yapılan düzlemin eğimi, kaynak kafa sayısı, elektrot açısı ve elektrotlar arası uzaklık gibi bir dizi ikincil kaynak parametreleri vardır. Bu değişkenler birbirlerinden bağımsız

olmayıp, birinin değiştirilmesi durumunda arzu edilen sonuca ulaşmak için diğerlerinden bir veya bir kaçının değiştirilmesi gerekebilir. Bu nedenle, söz konusu tüm bu kaynak değişkenlerinin etkilerinin iyi bilinmesi ve kontrol altında tutulması, iyi bir kaynak dikiş kalitesinin elde edilmesi için son derece önemlidir.

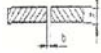
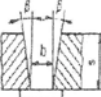
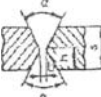
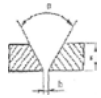
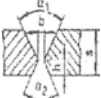
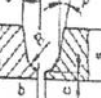
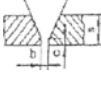
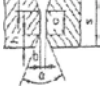
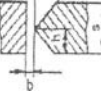
2.2.1. Kaynak ağzı

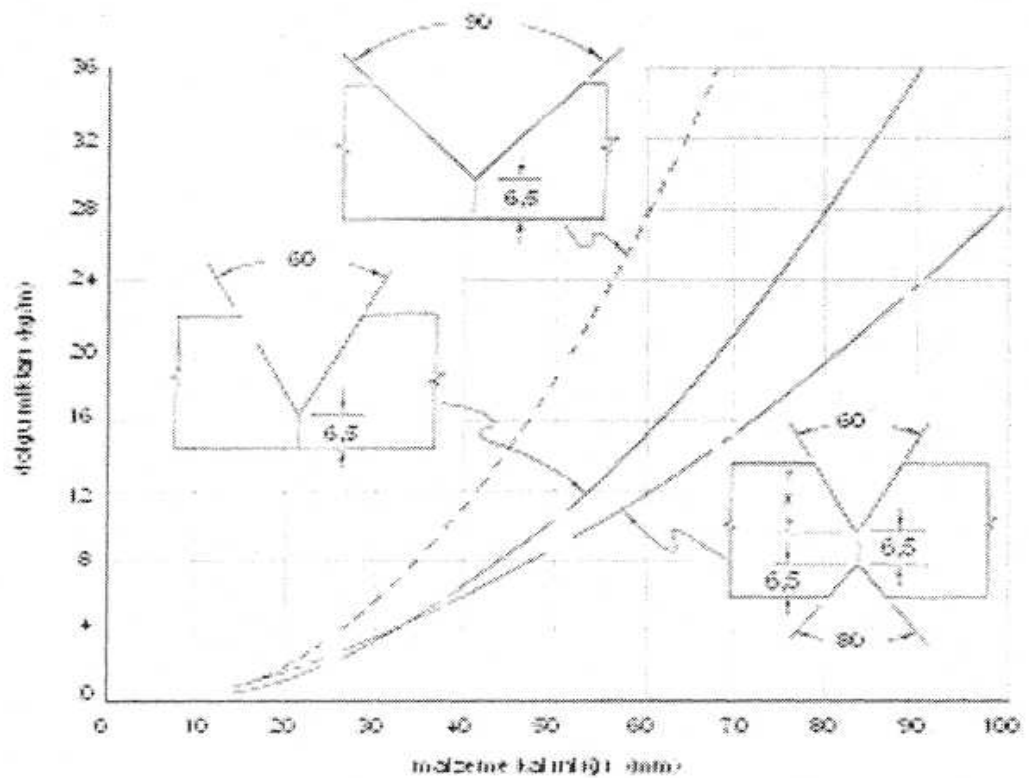
Ark kaynağında, iyi nüfuziyetli bir kaynak bağlantısının elde edilmesi için, kaynak birleştirme yerinin hazırlanması son derece önemlidir. Kaynağa hazırlık çalışması, kaynak yerinin temizlenmesi ve kaynak ağzının açılması olarak başlıca iki noktada düğümlenir. Kaynak ağzı esas olarak, nüfuziyet derinliğini artırmak için yapılır. Kaynak ağzı biçimine, birinci derecede kaynak edilecek parçanın kalınlığı etki eder. Birleştirme kaynağında, belirli bir kalınlığa kadar, parçaya ağız açmadan bir paso ile tozaltı kaynağı yapma olanağı vardır; ancak, belirli bir kalınlıktan sonra birleştirilecek parçalara çeşitli türlerde ağız açılır(Çizelge 2.1). Ağız açısı büyüdükçe nüfuziyet artmakta ve dikişin yüksekliği azalmaktadır. Ayrıca, ek kaynak metali tüketimi artar(Şekil 2.3). Ağız açısı küçüldükçe, daha dar ve daha derin bir kaynak dikişi elde edilir. Yani; kaynak dikişinin genişlik/derinlik oranı küçülerek, çatlak oluşum tehlikesi artabilir. Bu nedenle, toz kalıntı ve çatlak oluşum tehlikesinin azaltılması için, kaynak ağzı açısının 60°'den büyük olması önerilmektedir[Şirin, 2004]. Maksimum ağız açısını belirleyen kriter, dolgu metali ile esas metalin karışım oranıdır. Alın yüksekliği azaldıkça malzemenin delinme tehlikesi artar. Alın yüksekliğini belirleyen kriter ise elde edilmek istenen nüfuziyet derinliğidir.

2.2.2. Akım yoğunluğu

Akım yoğunluğu ($I/A=A/mm^2$), akım şiddetinin tel kesitine oranıdır. Akım yoğunluğunun artması ile dikişin nüfuziyeti artar. Ayrıca, akım yoğunluğunun artması ile ergime gücü de artacağından, dikiş yüksekliğinde de artış olur.

Çizelge 2.1. Tozaltı kaynağında kullanılan bazı kaynak ağız biçimleri [Anık ve diğ., 1991].

Kaynak Ağızı	İşaret	Kaynak Ağızı	İşaret	Kaynak Ağızı	İşaret
	I		U		X
	V		X		Y
	Y		X		K



Şekil 2.3. Tozaltı kaynak yönteminde, kaynak ağızı ile dolgu miktarı arasındaki ilişki

Kaynak tel çapının artması, akımın sabit kalması durumunda, akım yoğunluğunun azalmasına dolayısıyla nüfuziyetin azalmasına yol açar. Bunun dışında, tel çapının artması ark tutuşmasında zorluk yaratır ve düzensiz ark neden olur. Tel apı arttıkça kaynak telinin akım yüklenebilme kabiliyeti artar, yani iş parçasına daha yüksek seviyede akım yüklenebilir [şirin, 2004].

2.2.3. Kaynak akım şiddeti

Akım şiddeti, kaynak dikişinin biçimi üzerine en büyük etkiyi gösteren parametrelerden birisidir, kaynak telinin ergime hızı ve miktarını kontrol eder. Bunun yanı sıra, ergiyen esas metal miktarını ve nüfuziyet derinliğini etkiler. Seçilen kaynak hızı için akımın çok fazla olması durumunda ergiyen tel miktarı artar, buna bağlı olarak dikiş yüksekliliği, genişliği ve nüfuziyet derinliği de artar. Dolayısı ile kaynak banyosu büyür ve ısıdan etkilenen bölge (ITAB) genişler. Kaynak akımının çok fazla olması durumunda ise, düzensiz bir ark meydana gelir ve iş parçasının delinme tehlikesi artar. Akımın çok düşük olması ise hem nüfuziyet yetersizliğine hem de kaynak kepi yksekliliğinin arzu edilen seviyesinin altında kalmasına neden olur.

Akım şiddeti ile tel ilerleme hızı arasındaki ilişki

Akım şiddeti ile kaynak telinin ergime miktarı arasındaki ilişkiyi çıkarmak için uzun yıllardır süregelen birçok çalışma yapılmıştır. Bu alanda gerçekleştirilen ilk alışma DC(+) akım türü ve düşük alaşımlı çelikler için Lesnewich tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki dönemde, Lesnewich'in bu çıkarımı bazı deneysel çalışmalar temel alınarak Robinson tarafından hem DC(+) hem de DC(-) akım türü için yeniden düzenlenmiştir [Sugitani, 1990]. Son yıllarda ise, benzer alışmalar Chandel ve Tusek tarafından da yapılmıştır. Matematiksel modelleme yolu ile yürütülen bu çalışmaların sonucunda, tozaltı kaynak yönteminde DC(+), DC(-) ve AC akım trleri için akım şiddeti ile ergime hızı arasındaki ilişki formüle edilmiştir [Chandel et al, 1996. Tusek, 1999].

Chandel ve Tusek tarafından ayrı ayrı geliştirilen formüller Eş. 2.1 ile Eş.2.4’de verilmiş olup, burada, MR tel ergime miktarını (kg/h), I kaynak akımı (A), L telin serbest uç uzunluğunu (mm), d ise tel çapını (mm) vermektedir. Tel ergime miktarı ile ilgili olarak Metals Handbook(1983)’da da benzer bir formül verilmiştir (Eş. 2.5). Burada, MR tel ergime miktarı (lb/dk), I kaynak akımı (A), L telin serbest uç uzunluğu (inç), d ise tel çapıdır (inç).

Yine benzer şekilde, Lincoln Electric, 25 mm tel yüksekliği ve DC (+) akım türü ile 50 mm tel yüksekliği ve DC (-) akım türü için değişik akım değerlerindeki tel ergime hız ve miktarını içeren çeşitli çizelge ve grafikleri teknik bültenlerinde yayınlanmıştır[Lincoln Electric, 1994b]. Akım şiddetine bağlı olarak, söz konusu bu formüller yardımı ile elde edilen tel ergime miktarları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Chandel tarafından DC(+) ve DC(-) akım türü için geliştirilen formüller:

$$MR_{DC(+)} = 0.010371.I + (2,242 \times 10^{-6} \cdot I^2 \cdot L) / d^2 - 0,462 \quad (2.1)$$

$$MR_{DC(-)} = 0.016178 \cdot I + (2,087 \times 10^{-6} \cdot I^2 \cdot L) / d^2 - 0,643 \quad (2.2)$$

Tusek tarafından DC (+) ve DC (-) akım türü için geliştirilen formüller:

$$MR_{DC(+)} = 0.00938 \cdot I + (2,0194 \times 10^{-6} \cdot I^2 \cdot L) / d^2 - 0,234 \quad (2.3)$$

$$MR_{DC(-)} = 0.01384 \cdot I + (1,9626 \times 10^{-6} \cdot I^2 \cdot L) / d^2 - 0,407 \quad (2.4)$$

Metals Handbook tarafından verilen formül:

$$MR = 0.001 \cdot I [0,35 + d^2 + 2,08 \times 10^{-7} \cdot (I \cdot L / d^2)^{1,22}] \quad (2.5)$$

Genel olarak, tel çapının büyümesiyle birlikte tel ergime miktarının azaldığı, buna karşın kaynak akım değerinin ya da serbest tel uzunluğunun artması ile birlikte tel ergime miktarının da arttığı gözlenmektedir. Çizelge 2.2’den de görüldüğü gibi, Lincoln Electric ve Metals Handbook’a göre elde edilen değerlerin sadece DC(+) akım türü için geçerli olduğu görülmektedir. Dolayısıyla söz konusu bu formüllerin spiral dikişli borun üretiminde yapılacak olan tel ergime hesaplamalarına yardımcı olamayacağı düşünülmektedir. Chandel’in formülleri, Tusek’in formüllerine kıyasla daha yüksek tel ergime miktarlarını vermektedir.

Çizelge 2.2. 3,2 mm tel çapı için kaynak akımına bağlı olarak ergime miktarı (kg/h).

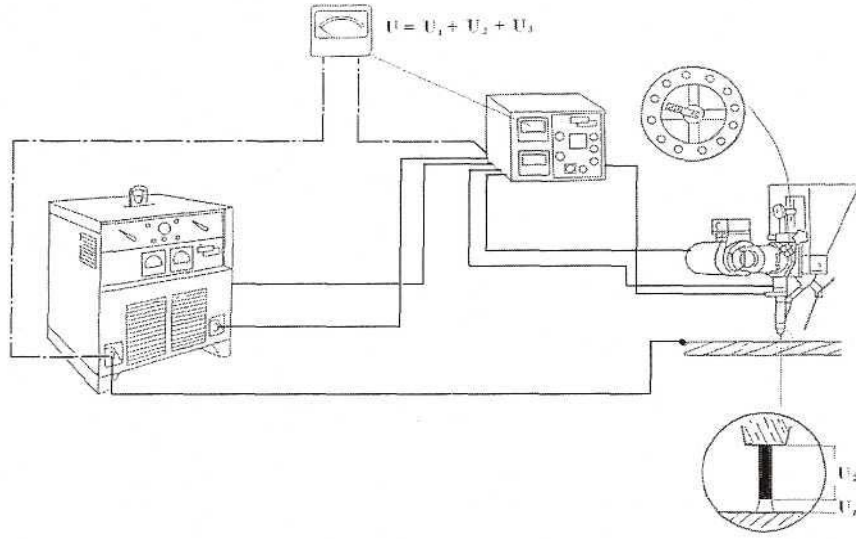
Akım şiddeti (Amp)	MR _{DC(+)}				MR _{DC(-)}		MR _{AC}	
	Lincoln Electric	Metals Handbook	Chandel	Tusek	Chandel	Tusek	Chandel	Tusek
400	3,80	4,50	4,56	4,31	6,64	5,90	5,60	5,10
500	5,20	5,83	6,09	5,69	8,72	7,71	7,41	6,70
600	6,70	7,25	7,73	7,17	10,90	9,62	9,31	8,40
700	8,50	8,77	9,48	8,75	13,18	11,63	11,33	10,19
800	10,60	10,39	11,34	10,43	15,56	13,73	13,45	12,08
900		12,11	13,31	12,20	18,04	15,93	15,68	14,07
1000		13,94	15,38	14,08	20,63	18,23	18,01	16,15
1100		15,87	17,57	16,05	23,32	20,62	20,44	18,33

DC (-) akım türündeki tel ergime miktarı DC(+) akım türündeki ergime miktarına göre Chandel’in formülünde % 40 ile 50 arasında daha yüksek iken, bu oran Tusek formüllerinde % 33 ile 40 arasındadır. DC(+) akım türünde 400 A kaynak akımında Chandel’in formülü Tusek’in formülüne göre yaklaşık % 5,5 oranında daha fazla tel ergime miktarı verirken bu oran kaynak akımının 1000 A olması halinde % 9,5 değerlerine ulaşmaktadır.

2.2.4. Ark gerilimi

Ark gerilimi esas olarak, ergime bölgesinin ve kaynak kepinin biçimine etki eder. Ark geriliminin yükseltilmesi ile birlikte, kaynak kepi daha geniş ve düze yakın bir biçim alır. Ancak, ark içinde kalan toz miktarı artacağından toz kullanımı da artar. Gerilim yükseldikçe, dikişin nüfuziyeti azalır. Ark gerilimi, ark boyunun bir fonksiyonudur; yani, ark boyu değiştikçe ark gerilimi de değişir. Yüksek bir ark

gerilimi, uzun ark boyu ile çalışmayı gerektirir (Şekil 2.4). Bu da, daha fazla miktarda tozun cüruf haline geçmesine neden olur. Bunun sonucunda da, kaynak dikişinin kimyasal bileşimi değişir. Örneğin; asit karakterli toz kullanımı durumunda, dikişteki Si miktarı yükselir. Kaynak dikişinde çatlamaya neden olan Mn ve Si içeriğini kontrol altına almak için gerilim sınırlaması önem taşımaktadır.



Şekil 2.4. Tozaltı kaynağında ark geriliminin gösterimi.

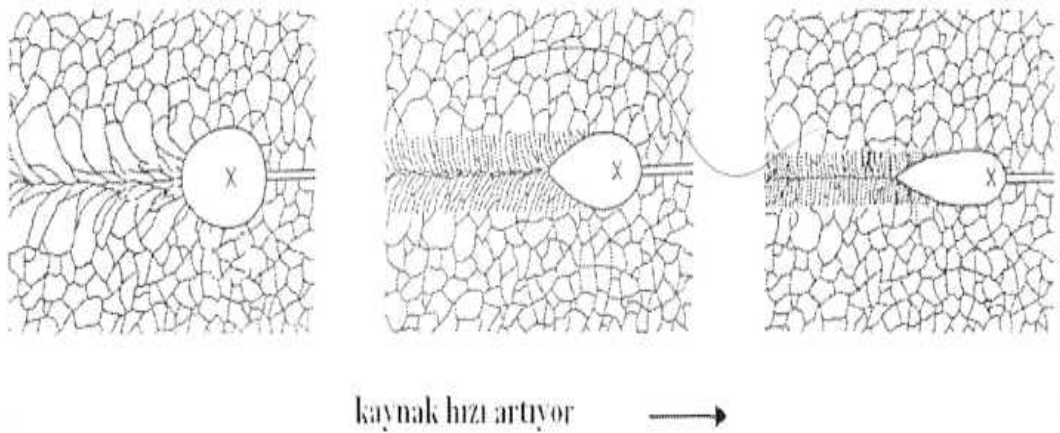
Ark geriliminin aşırı fazla olması durumunda, kaynak banyosunu örten toz örtüsü yırtılarak, kaynak metalinin hava ile temasına bunun sonucunda da kaynakta gözenek oluşumuna ve ark üflemesine karşı hassasiyet artar. Kaynak akımının sabit tutulduğu ve ark geriliminin de bu akıma göre düşük kaldığı durumda, esas metaldeki ergime iyi bir kaynak dikişi oluşturmaya yetmez. Kaynak hızı arttırıldığında, ark gerilimi olabilen en düşük düzeyde tutulmalıdır.

2.2.5. Kaynak hızı

Üretim hızının ve kaynak dikişinin metalurjik açıdan kalitesini belirleyen en önemli parametrelerinden birisidir. Ayrıca, kaynak hızı kaynak bağlantısının mekanik ve tokluk özellikleri üzerinde son derece etkili olan ısı girdisini de etkilemektedir.

Düşük bir hızla yapılan kaynakta ergiyen ek kaynak metali (tel) miktarı artar; dolayısı ile kaynak banyosu büyür. Diğer bir deyişle, ısı girdisi artar ve normal kaynak hızlarında delinmemesi gereken parçalarda, delinme tehlikesi ortaya çıkar. Aşırı hız düşümü durumunda, çatlak oluşum tehlikesinin çok yüksek olduğu şapkalı kaynak kepi oluşur. Düşük kaynak hızlarında, elektrot fazla uzaklaşmadan banyo katılaşmaya başlayacağından, dikiş üzerindeki tırtıllar arasındaki açı büyür. Ayrıca, arkın dışına taşarak cüruf kalıntısına neden olabilecek düzeyde oldukça büyük bir kaynak banyosu oluşturur. Kaynak hızı yükseldikçe, nüfuziyet ile dikiş genişliğinin azaldığı görülür. Ayrıca, kaynak hızının artması ile birlikte dikiş üzerindeki tırtıllar arasındaki açı da küçülmeye başlar. Kaynak hızının aşırı yüksek olması durumunda nüfuziyet azalır, yanma oluğu, gözenek, ark üflemesi ve düzensiz bir dikiş oluşum tehlikesi artar [Şirin, 2004].

Kaynak dikişi genel olarak ergiyen tel ile ergiyen esas metalden oluşur. Tozaltı kaynağında, kaynak metali içinde ergiyen esas metal miktarı % 10 ile 60 arasında olup, bu oran kaynak hızının yükselmesi ile azalan yönde değişir. Yani; kaynak metali içindeki ergiyen esas metal miktarı azalır [ASM Handbook, 1983]. Kaynak hızı ile kaynak banyosunun biçimini de kontrol etme olanağı vardır. Düşük hızlı bir kaynak işleminde kaynak banyosu hemen hemen dairesel (eliptik) iken, kaynak hızının artması ile bu dairesellik kaybolur (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Kaynak hızının kaynak banyo biçimi üzerindeki etkisi.

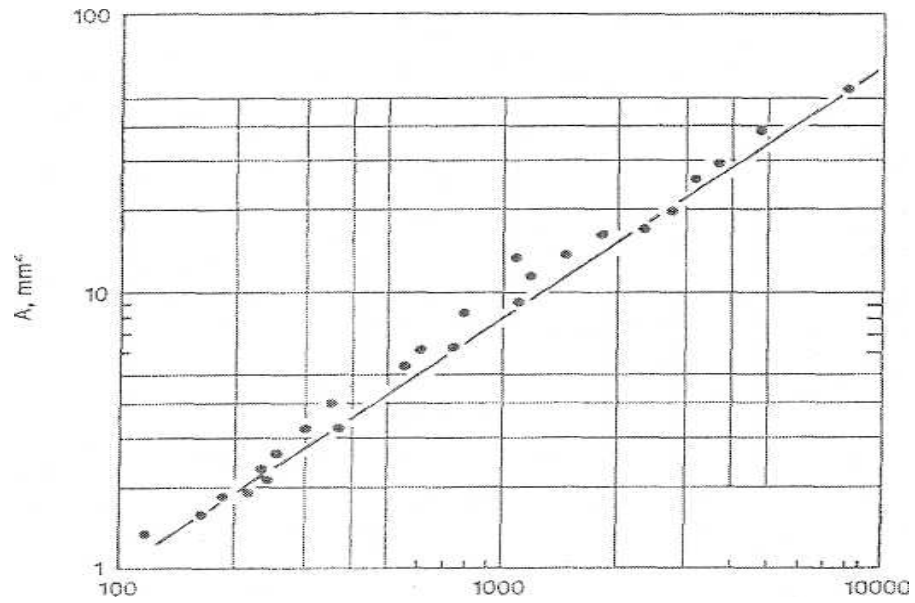
Yapılan araştırmalar, ark geriliminin ergimiş b6lgenin kesit alanı 6zerinde 6nemli bir etkisinin bulunmadığını, buna karşın kaynak hızı ve kaynak akım şiddetinin ergimiş b6lgenin kesit alanını belirleyen asıl etkenler olduğunu g6stermiştir. Tozaltı kaynağı ile yapılan bu 6alışmalardan birinde, ergimiş b6lgenin kesit alanı ile kaynak hızı ve kaynak akımı arasındaki ilişki Eş.2.6'daki gibi form6le edilmiştir [Linnert, 1994]. Logaritmik olarak hazırlanmış bu form6lde; A, ergimiş b6lgenin kesit alanını (mm²), I, kaynak akım şiddetini (A) ve S, kaynak hızını (cm/dk) ifade etmektedir. şekil 2.6'da, ergime kesit alanının I^{1,716}/S'in bir fonksiyonu olarak değişiminin grafiksel g6sterimi, şekil 2.7'de ise nomogram olarak d6zenlenmiş hali verilmektedir. S6z konusu bu denklemin yeniden d6zenlenmesi ile kaynak ağzı a6ılmamış tek pasolu alın kaynağında, ergime kesit alanı Eş.2.7'ye g6re kolaylıkla hesaplanabilir.

$$\log_{10}A = 0,903 \cdot \log_{10}(I^{1,716} / S) - 0,78 \quad (2.6)$$

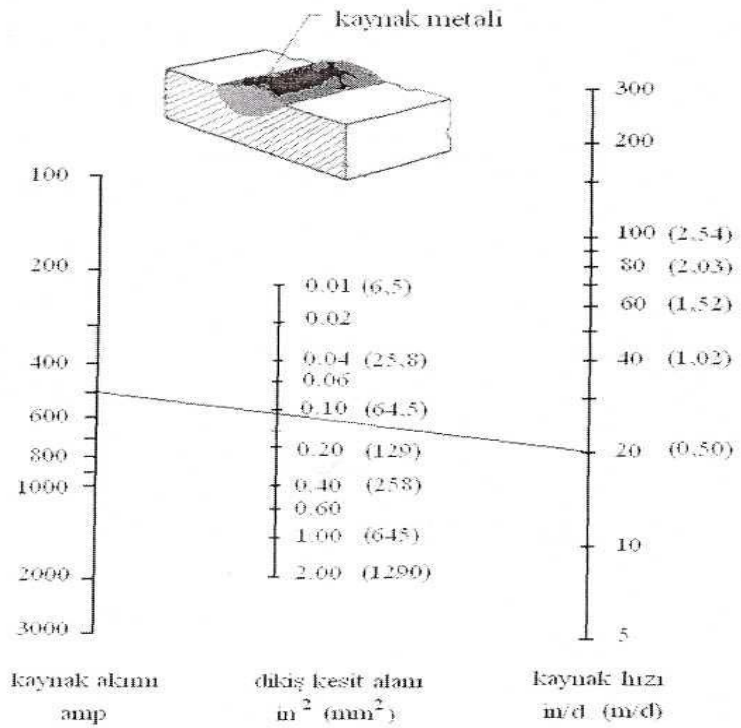
$$A = I^{1,55} / (10^{3,95} \cdot S^{0,903}) \quad (2.7)$$

Tek pasolu alın kaynağında, kaynak akımı, kaynak hızı ve gerilime bağlı olarak n6fuziyet derinliği aşağıdaki form6l yardımı ile hesaplanılabilir (Eş. 2.8). Burada, I, kaynak akım şiddetini (A), S, kaynak hızını (in6/dk), E, ark gerilimini (V), P ise n6fuziyet derinliğini (in6) ifade etmektedir. K ise sabit bir sayı olup, CS t6r6 tozlar i6in 0,0012 olarak alınabilir. S6z konusu bu form6l6n grafiksel g6sterimi ise şekil 2.8'de verilmiştir. Kaynak hızı ile kaynak akımı arasındaki oran, yanma olduğu 6zerinde olduk6a etkilidir. Kaynak hızı ile kaynak akımının tek pasolu kaynak bağlantılarında yanma oluğu 6zerindeki etkisi şekil 2.9 'da verilmiştir.

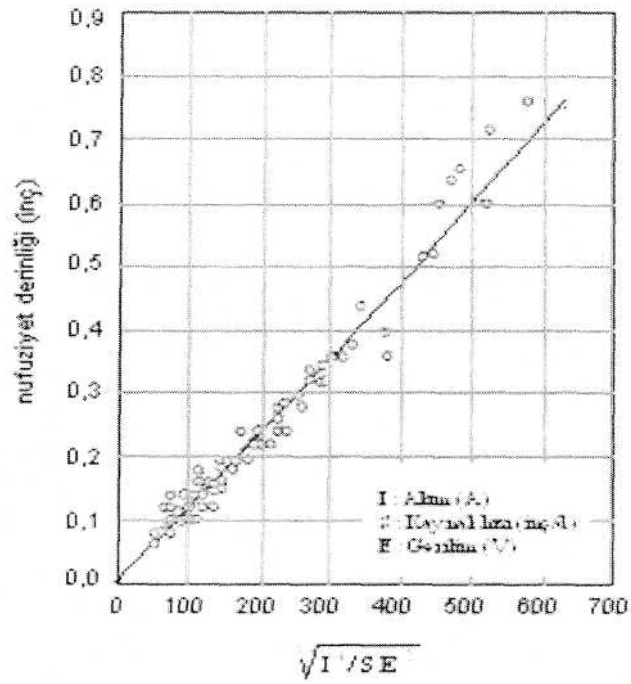
$$P = K \cdot \sqrt[3]{I^4 / S} \cdot E^2 \quad (2.8)$$



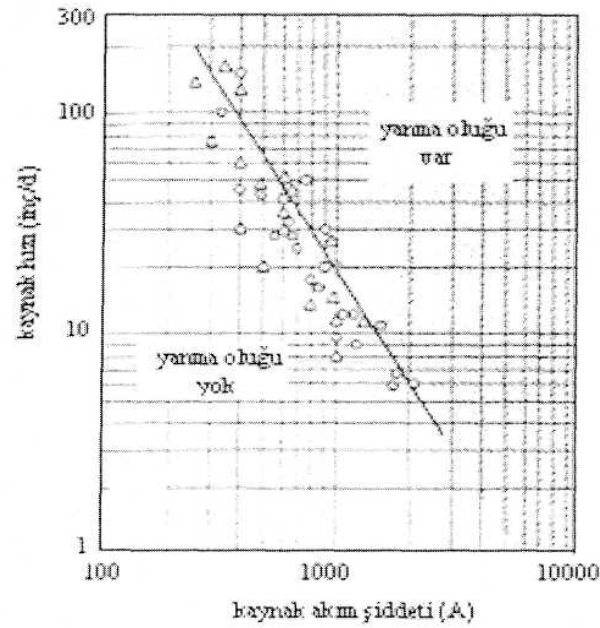
Şekil 2.6. Tozaltı kaynağında kaynak akımı ve kaynak hızının ergime kesit alanı üzerindeki etkisi.



Şekil 2.7. Kaynak akımı, kaynak hızı ve ergime kesit alanı arasındaki ilişki [ASM Handbook Committee, 1983].



Şekil 2.8. Kaynak akımı, kaynak hızı ve ark geriliminin nüfuziyet derinliğine etkisi [ASM Handbook Committee, 1983].



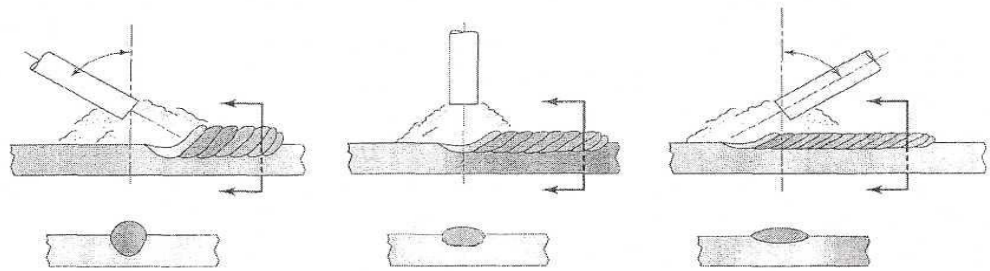
Şekil 2.9. Kaynak hızı, kaynak akımı ve yanma oluğu arasındaki ilişki [ASM Handbook Committee, 1983].

2.2.6. Kaynak düzlemi ve elektrot açısı

Diğer tüm kaynak yöntemlerinde olduğu gibi, tozaltı kaynağında da kaynak elektrodunun eğim açısı kaynak dikiş biçimini ve nüfuziyetini etkiler. Elektrodun ucu kaynak yönünün aksi yönüne doğru yönelmiş ise, bu tekniğe “sağa kaynak tekniği”, elektrodun ucu kaynak doğrultusuna göre yönelmiş ise buna “sola kaynak tekniği” adı verilir [Şirin, 2001]. Tüm diğer koşullar aynı tutularak, hareket açısı sıfırdan ibaret sola kaynak tekniğine doğru artırılacak olursa nüfuziyet azalır ve kaynak dikişi geniş ve düz bir durum alır. En yüksek nüfuziyet sağa kaynak tekniği ile hareket açısı 25° iken oluşur. Sağa kaynak tekniği aynı zamanda, daha dış bükey ve daha dar bir dikiş oluşturur. Tüm pozisyonlarda, kaynak banyosunun daha iyi kontrol edilebilmesi için önerilen elektrot eğim açısı 5 ila 15° ’dir (Şekil 2.10).

Tozaltı kaynağı esas olarak yatay pozisyonda yapılır. Kaynak yapılan parçanın bulunduğu yatay düzleme göre sahip olduğu eğimin 6° ’yi aşması durumunda, kaynağın yönüne göre kaynak dikişinin biçimi de değişir. Eğimli yüzlerde yokuş aşağı yapılan kaynaklarda nüfuziyet oldukça az ve dikiş geniştir, yokuş yukarı yapılan kaynaklarda ise nüfuziyet ve dikiş yüksekliği çok fazla, kaynak dikiş genişliği ise azdır.

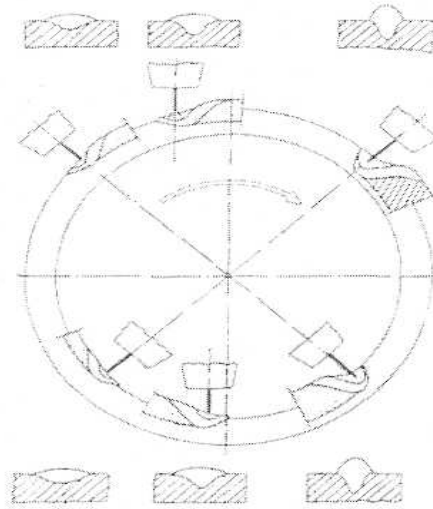
Yokuş yukarı yapılan kaynakta dikişte çatlak oluşumu, yokuş aşağı kaynakta ise birleşme hataları ve cüruf kalıntıları meydana gelebilir [Tülbentçi, 1998]. Aşağıya doğru kaynakta, kaynak banyosu elektroda doğru akıma eğilimi gösterir, bu ise düzensiz bir ergime bölgesi oluşturur.



Şekil 2.10. Elektrot eğiminin kaynak dikiş biçimi üzerindeki etkisi

Çevresel kaynak yada silindirik parçaların kaynağı, düz bir sacın kaynağına göre bazı farklılıklar gösterir. En önemli farklılık, ergimiş toz cürufu ve ergimiş kaynak banyosunun akma eğilimi göstermesidir. Kaynak metalinin akmasını engellemenin tek yolu ise, kaynak banyosunun borunun düşey eksenine geldiğinde katılaşmasını tamamlamış olmasıdır. Bu nedenle, silindirik parçaların kaynağında telin bulunduğu yerin dikey eksenin sağında veya solunda bulunması ve telin ucu ile dikey eksen arasındaki mesafenin fazlalığı veya azlığı kaynak dikişinin biçimin etki eden önemli faktörlerdir. Telin yeri ile eksen arasındaki uzaklık, yokuş yukarı yönde artarsa nüfuziyet azalır, dikiş genişler ve aynı zamanda cüruf kalıntılarına neden olur. Eğer bu uzaklık yokuş aşağı yönde artarsa, nüfuziyet ve dikiş yüksekliği artar (Şekil 2.11).

Kaynak eğim açıları tek kafa, çift kafa ya da üç kafa kullanım durumuna göre farklılık göstermektedir. Tek kafa kullanımında Lincoln Electric (1983) elektrot eğim açısını $3-5^\circ$ sola kaynak tekniği olarak vermektedir. Çift kafa kullanımında ise ilk kafanın eğim açısı bütün kaynaklarda 0° olarak verilirken ikinci kafanın eğim açısı, Lincoln Elektrik (1991) ve Metals Handbook (1983)'de $12-15^\circ$ sağa kaynak tekniği, Messer Griesheim (1970)'de 25° sağa kaynak tekniği olarak önerilmektedir. Europipe uygulaması ise $15-20^\circ$ sağa kaynak tekniği şeklindedir [Brensing and Summer, 1998].



Şekil 2.11. Kaynak düzleminin kaynak biçimi üzerindeki etkisi [Tülbentçi, 1998].

2.2.7. Serbest tel uzunluğu ve elektrotlar arası uzaklık

Kaynak telinin dışarıda kalan kısmı (serbest tel uzunluğu), kaynak memesinin parçaya olan uzaklığı ile ifade edilir. Akım yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda ($>125 \text{ A/mm}^2$), telin serbest ucunun uzunluğu önemli bir faktör olarak kendini belli eder [Tülbentçi ve diğ., 1997b]. Serbest tel uzunluğunun artması, elektrik direncinin artmasına bu da kaynak telinin daha fazla ısınarak tel ergime miktarında küçük de olsa bir artışa neden olur.

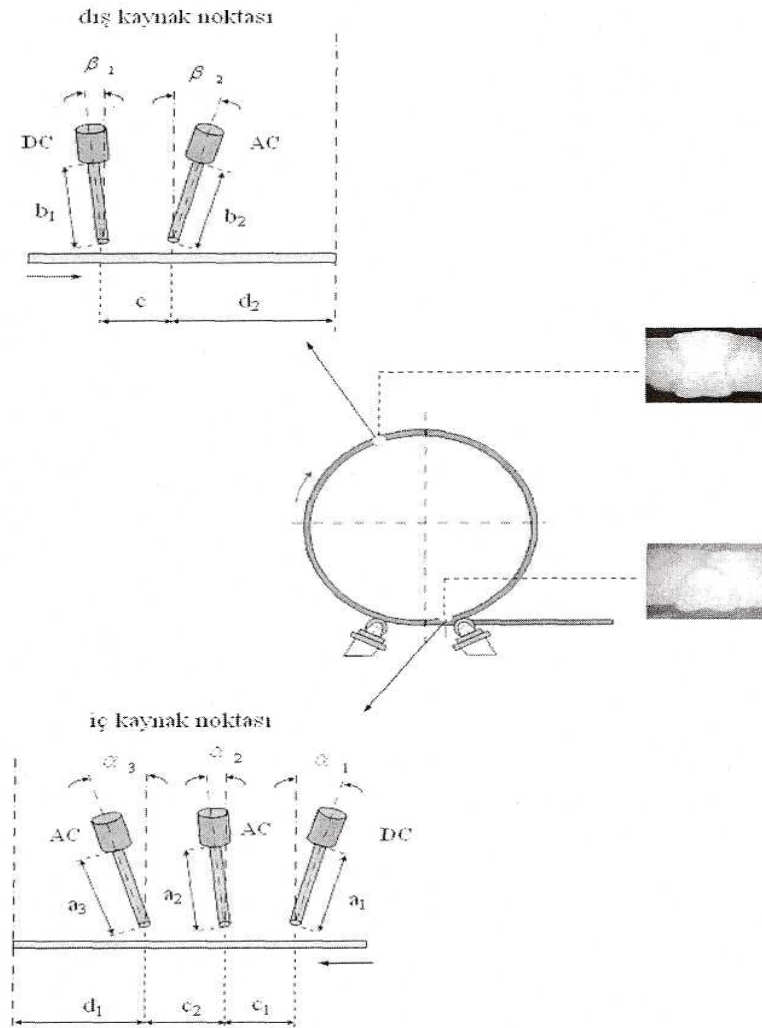
Tozaltı kaynak yönteminde, telin serbest ucunun uzunluğunun artması, elektriksel olarak devreye bir direncin daha eklenmesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle, serbest tel ucunun artırılması halinde ark gerilimini de arttırmak gerekir. Düşük ark gerilimi, yani tel serbest uzunluğunun artması, nüfuziyetin azalmasına, kaynak dikişinin daralmasına, dikiş yüksekliğinin artmasına ve cürufun temizlenmesinin zorlaşmasına yol açar. Deneyimler, temas memesi ile iş parçası arasındaki uzaklığının azalmasıyla daha kararlı bir arkın oluştuğunu ve daha homojen görünüşlü bir kaynak dikişinin elde edildiğini göstermektedir. Zira; serbest tel ucunun aşırı fazla olması durumunda memeden çıkan tel ucunun salınımlar yapması, arkın pozisyonunun değişmesine ve bu da dikişin bozulmasına yol açar. Spiral dikişli boru üretimi için önerilen serbest tel uzunluğu 20–35 mm arasındadır.

Çevresel kaynak uygulamalarında, elektrotlar arası uzaklığın kaynak dikişinin biçimi ve kalitesi üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Elektrotlar arasındaki uzaklığın azalması daha dar ve daha derin bir nüfuziyete sahip dikiş elde edilmesine yol açar. Elektrotlar arasındaki uzaklık arttıkça, dikiş genişler ve nüfuziyet azalır. Elektrotlar arası uzaklık aynı zamandan ark kararlığı üzerinde de etkin bir şekilde rol oynar.

Elektrotların birbirine çok yakın olması durumunda, ergimiş metalin ya da cürufun geriye akarak ilk arkın altına girmesi ve arkta düzensizliklere yol açması olasıdır. Elektrotların birbirine çok uzak olması halinde ise, ergimiş metalin katılaşması nedeni ile ikinci arkta düzensizlikler olabilir [Şirin, 2001]. Elektrotlar arasındaki

uzaklık, Lincoln Electric (1993) tarafından 11-40 mm, Messer Griesheim tarafından 12-35 mm olarak önerilmektedir. Mannesmann Euro Pipe uygulaması ise 16–20 mm'dir.

Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde de kaynak kafalarının pozisyonlaşması oldukça büyük bir öneme sahiptir (Şekil 2.12). Burada, kafa eğim açıları, kafalar arası uzaklık, kaynak noktasının borunun düşey eksenine göre konumu ve her bir kafadaki serbest tel uzunluğu, gerek elde edilecek olan kaynak dikişinin biçimi, gerekse hata oluşumu açısından oldukça önemli etkiye sahip parametrelerdir.



Şekil 2.12. Spiral dikişli boru üretiminde kaynak kafalarının yerleşimi

2.3. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Sarf Malzemeleri

Tozaltı kaynak yönetiminin tüm uygulamalarında kaynak ağzı dolgu malzemesi ya da yüzey dolgu malzemesi olarak tel elektrotlar kullanılır. Kaynak tozları ise ergimiş kaynak banyosunu atmosferin zararlı etkilerine karşı korur. Bu nedenle, tozaltı kaynak yönteminde kullanılmakta olan tel ve tozların kimyasal ve fiziksel özellikleri elde edilen kaynak bağlantısının kimyasal bileşimi, mikro yapısı ve tokluk özellikleri üzerinde son derece etkilidir.

2.3.1. Kaynak tozları

Kaynak tozlarının kaynak işlemindeki en önemli iki görevi, arkta kararlılık sağlamak ve kaynak banyosu üzerinde örtü oluşturarak kaynak dikişini atmosferin zararlı etkilerine karşı korumaktır. Ayrıca, kaynak dikişinin soğuma hızını yavaşlatarak ve gerektiğinde kaynak banyosuna alaşım elementi girdisi sağlayarak kaynak dikişinin mekanik özelliklerinin istenen değerlerde oluşmasını sağlar. Kaynak tozları imal yöntemlerine göre ergimiş tozlar, karışık tozlar ve aglomere tozlar olmak üzere üç grupta ele alınırken, kaynak metalini alaşımlama özelliğine göre nötr tozlar, aktif tozlar ve alaşımlı tozlar olmak üzere üçe ayrılırlar. Kimyasal bileşimlerine göre de, kaynak tozları asit, nötr ve bazik karakterli tozlar olarak sınıflandırılmaktadır. Tozların uygulamalardaki tanımlarında, içerdikleri mangan oksit oranları da bir ölçek olarak kabul edilebilmektedir. Bu yönden ise tozlar, yüksek manganlı tozlar (% 30 - 45 MnO), orta seviyede mangan içeren tozlar (% 14 - 20 MnO) ve düşük manganlı tozlar (< % 14 MnO) olarak üç grupta toplanmaktadır.

Ergimiş tozlar

Bu tozların üretiminde kuvarz, manganez cevheri, dolomit ve kil gibi maddeler belirli oranda karıştırılarak, ergitme fırınında bir araya getirilir. Fırınlarındaki ergime işlemi 1500 ile 1800 °C arasında gerçekleşmekte olup, fırında ergiyen

karışım, tane boyutlarında homojenlik sağlama amacı ile ufalanarak eleme işleminden geçirilir. Daha sonra da su verilerek soğutma yapılır.

Pahalı bir yöntem olmakla birlikte, tane büyüklüğündeki homojenlik, tanelerin aynı kimyasal bileşime sahip olması ve nem alma özelliğinin çok düşük olması gibi bir dizi üstünlüğü vardır. Ancak, ergimiş tozlar bünyelerindeki hidroksil iyonları (OH) nedeni ile kaynak metalindeki hidrojen içeriğinin artmasına neden olur. Ergimiş tozların üretimleri sırasındaki ergime nedeni ile yapısında var olan metalik katkıların çoğu oksitlenerek yapıdan ayrılır. Tozun üretimi sırasındaki ergime sıcaklığının yüksek olması nedeni ile tozun bünyesine dezoksidan ve alaşım elementlerinin eklenmesi olanaklı değildir [Şirin, 2004].

Karışık tozlar

Bu gruba giren tozlar iki veya daha fazla tozun karıştırılması ile elde edilir. Kullanılacak olan hammaddeler öncelikle gayet ince olarak öğütülerek karıştırılır. Karıştırılan ham toz, küçük parçacıklar halinde pres edilir ve bir alevli fırına konularak 1000 ile 1100 °C sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulur. Sinterlenen parçalar daha sonra ufalanarak eleklerden geçirilir ve istenen tane büyüklüğüne ayrılır. Nem alma özelliğinin olması, kaynak metalinde gözenek ya da hidrojen kırılabilirliği tehlikesi artırır. Karışık tozların üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

1. İşlem sıcaklığının düşük olması, tozun içeriğine dezoksidan ve/veya alaşım elementleri eklenmesine olanak sağlar.
2. Yoğunluğun düşük olması, kaynak banyosu üzerinde daha kalın bir toz tabakasının oluşumuna olanak sağlar.
3. Soğuma sonrası cürufun yüzeyden kalkması kolaydır.

Aglomere tozlar

Aglomere tozlar son zamanlarda geliştirilen ve kullanımı gittikçe artan tozlardır. Tozun üretiminde genel olarak silikatlar, floridler, demir oksitler ve karbonatlar ile

kaynak işlemi sırasında cüruf oluşumu, arkın iyonizasyonu ve dezoksidasyonu gibi görevleri yerine getiren maddeler kullanılır. Toz taneciklerinin olabildiğince aynı tane büyüklüğünde, aynı ağırlıkta ve aynı biçimde olması arzu edilir. Ham tozlar, seramik veya mineral esaslı bir yapıştırıcı madde ile karıştırılarak 500 ila 800 °C arasında aglomerasyon işlemine tabi tutulur. Aglomerasyon işleminden sonra var olan nemin alınması için, karışım tavlama işlemine tabi tutulur ve daha sonra elenerek istenilen tane büyüklüğüne erişir. Karışık ve aglomere tozlar yüksek nemli ortamlarda uzun süre kaldıklarında bünyelerine nem çekerler. Bu da, kaynak işlemi sırasında, kaynak metalinde çatlamaya yol açan hidrojen oluşumuna neden olur. Aglomere tozlar, ergimiş tozlara nazaran şu farklılıklara sahiptir.

1. Ergime sırasında, Mn ve diğer elementlerin kaynak metaline geçişi aglomere tozlarda daha fazladır.
2. Kaynak metalinde istenen metalurjik etkilere uygun tozun imali aglomerasyon yönteminde daha kolaydır.
3. Aglomere tozların tüketimi, ergimiş tozlara kıyasla daha azdır

Kaynak tozları, gerektiğinde kaynak banyosuna alaşım elementi girdisi sağlayarak kaynak dikişinin mekanik dayanımının istenen değerlerde oluşmasını sağlar. Kaynak tozlarını kaynak metalini alaşımlama yeteneklerine göre de sınıflandırma olanağı vardır. Kaynak tozunun alaşımlama özelliğini ifade eden nötrlük derecesi (wall neutrality number) belirli bir toz kullanımında, kaynak metalindeki Mn ve Si içeriğinin değişimleri önceden kestirebilmek için oldukça yararlı bir indekstir. Nötrlük derecesi, aynı koşullar altında elde edilen iki farklı kaynak metalinin kimyasal bileşimlerindeki Mn ve Si miktarlarındaki farklılığın saptanması ile elde edilir ve “Eş. 2.9” da verilen formüle göre hesaplanır. Kaynak koşulları arasındaki tek fark, ikinci kaynaktaki ark geriliminin birincisinden 8 V daha fazla olmasıdır. Buna göre, elde edilen değer $N < 40$ ise nötr toz, $N > 40$ ise aktif toz grubuna girmektedir. Nötrlük derecesi (N) alaşımlı tozları içermemektedir. Nötr kaynak tozları içeriklerinde, kaynak metalinin alaşımlamasına yol açacak metal, alaşım ya

da bileşik içermeyen ve kaynak metalinde herhangi bir kimyasal değişim oluşturmayan tozlardır.

$$N = (|\Delta\%Si| + |\Delta\%Mn|) \quad (2.9)$$

Nötr kaynak tozu kullanımında, dezoksidasyon ve kaynak metalinin alaşımlandırılması görevi, kullanılan kaynak telinin kimyasal bileşimi ile sağlanır. Bu nedenle, kaynak dikişinin gözenek oluşum ve özellikle sıcak çatlak oluşum tehlikesi fazladır. Aktif tozlar ise bünyelerinde önemli bir oranda Si ve bunun yanı sıra belirli bir oranda Mn içerirler. Bu içeriklerin amacı, kaynak banyosunda yeterli bir dezoksidasyon sağlayarak kaynak metalindeki gözenek ve çatlak oluşum eğilimini azaltmaktır. Aktif tozlar düşük Mn ve Si içerikli kaynak telleri ile eşlendirilirler.

Alaşımlı kaynak tozları ise, kaynak metalinin alaşımlandırılması için yapılarında Mn ve Si gibi oldukça yüksek oranda metalik bileşenler içeren tozlardır. Kaynak metalindeki alaşım miktarı, ark gerilimi ve ark uzunluğu ile doğrudan ilintili olduğundan işletme sırasında bu değişkenlerin çok sıkı bir şekilde kontrol altına alınması gerekir. Genellikle, normal karbonlu kaynak telleri ile kullanıldıkları için ekonomik bir üstünlük sağlarlar. Ark geriliminin değişimi ile kaynak metalinin bileşimini oldukça geniş bir aralık ve kombinasyon içinde ayarlama olanağı vardır. Alaşımlı kaynak tozları genellikle düşük alaşımlı çeliklerin kaynağında kullanılır [Şirin, 2004].

Kaynak tozlarının kimyasal özellikleri

Kaynak tozları, baziklik ölçeğine (Çizelge 2.3) ve kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılmaktadır. Tozların sahip olduğu kimyasal özellikler, damla hacmi ve frekansını etkilemektedir. Sabit kaynak parametreleri ile, en yüksek damla frekansı nötr tozlarda, en düşük damla frekansı ise yüksek bazik karakterli kaynak tozlarında elde edilmektedir. Bonischewski 'ye göre kaynak tozlarının baziklik ölçeği formülü

Eş.2.10’da verilmiştir. Söz konusu bu denklemde, paydaki bileşenler bazık, paydadaki bileşenler ise asit karakterli bileşenlerdir. Buradaki nötr kavramı ile kaynak tozunun alaşımlama yeteneği değil, tozun içindeki bazık ve asidik bileşenlerin oranı ifade edilmektedir.

$$B = \frac{[\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{CaF}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O} + \text{SrO} + 0,5(\text{MnO} + \text{FeO})]}{\text{SiO}_2 + 0,5(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)} \quad (2.10)$$

Çizelge 2.3. Kaynak tozlarının bazıklığe göre sınıflandırılması

Kaynak tozu	Asidik	Nötr	Bazık	Yüksek bazık
Baziklik ölçeği (B)	<1.0	1.0 – 1.5	1.5 – 2.5	>2.5

Genel olarak kaynak tozlarının büyük bir kısmını SiO₂ oluşturur. SiO₂ tozun özellikle yüksek akım şiddeti ile yüklenebilmesini sağlar. Tozdaki silisyum, kaynak sırasında kaynak banyosunu dezokside ederek gazı alınmış bir kaynak banyosunu meydana getirir ki, bu da dikişin gözeneksiz olmasını sağlar. Si ayrıca cürufun akışını sağlar. Mangan içermeyen fakat Si miktarı yüksek tozlar, kir ve pasa karşı çok hassas olduğu için malzemenin kaynak ağzı iyi temizlenmelidir. Tozda bulunan bir diğer önemli madde de MnO’dur. MnO miktarı arttıkça tozun akım yüklenebilme kabiliyeti azalır. Çoğu kaynak tozları, bünyelerinde % 10 dolayında MnO içerir. Kaynak tozu bileşimindeki SiO₂ miktarının % 40’ı geçmesi ile birlikte kaynak metalindeki Si miktarı hızlı bir artış gösterir.

Tozaltı kaynağı uygulamasında, işlem sırasında ortaya çıkan metalurjik olaylar büyük anlam taşımaktadır. Bu reaksiyonların derecesi, Si ve Mn’in redüklenmesi ve bununla birlikte kaynak dikişine geçişine, kaynak tozunun karakterine, reaksiyon bölgesindeki sıcaklığa, uygulanan kaynak parametrelerine, birbirine ilgi duyan elementlerin değişik oranına ve reaksiyon süresine bağlı olarak değişmektedir.

Tozaltı kaynağında, ergimiş kaynak metaline ile ergimiş toz arasında bir dizi kimyasal reaksiyon oluşur. Örneğin MnO içermeyen yüksek SiO₂ içerikli kaynak tozlarında kaynak metaline tozdan büyük miktarda silisyumu indirger. Aynı zamanda kaynak telindeki mangan oksidasyona uğrar (Eş. 2.11 ve Eş. 2.12). Bu da, kaynak metalindeki silisyumun artmasına ve manganın azalmasına yol açar. Bu gibi durumlarda, dikişin Mn miktarını ayarlamak için yüksek Mn içerikli kaynak telleri kullanılmalıdır[Şirin, 2001].



SiO₂ ve MnO içeren tozlarda, tozdaki MnO buharlaşan demirle birleşerek indirgenir. Böylelikle tozdan kaynak metaline Mn geçişi gerçekleşir (Eş. 2.13). Manganın oksidasyonu sonucu serbest kalan Si kaynak metaline geçer (Eş. 2.12). Kaynak metaline tozdan Mn ve Si geçişine ark gerilimi, kaynak hızı, tel çapı, kaynak ağız açısı gibi faktörlerin oldukça önemli etkisi vardır. Akım şiddeti yükseldikçe Mn ve Si miktarı azalır. Öte yandan, kısa ark boyu ile kaynak yapıldığında uzun ark boyuna kıyasla daha az toz reaksiyona girmekte ve dolayısıyla kaynak banyosunda daha az alaşımlanmaktadır. Kaynak hızı arttıkça kaynak metalindeki Mn ve Si miktarı azalır. Kaynak tel çapı arttıkça kaynak yerine yığılan toz miktarı artar ve böylelikle kaynak metaline geçen Mn ve Si miktarı da artar[Şirin, 2001].

Kaynak tozlarının metalurjik davranışı alaşım elementlerinin yanma yada geçişi ile karakterize edilir. Yanma (burn out) ve geçiş (pick up), kaynak metalinin kimyasal bileşimi ile kaynak telinin kimyasal bileşimi arasındaki fark olarak tanımlanabilir. Si ve Mn, yüksek mukavemetli az alaşımlı çeliklerin kaynak metaline özellikleri üzerinde son derece önemli etkiye sahip elementlerdir. Bu nedenle, Si ve Mn

reaksiyonları kaynak tozlarının sınıflandırılmasında önemli bir baz oluşturur. Kaynak metalindeki Mn miktarı yaklaşık bir değerle Eş. 2.14'e göre hesaplanabilir. Burada, Mn_{kaynak} , Mn_{tel} ve Mn_{metal} sırasıyla kaynak metali, kaynak teli ve ana kaynak metalindeki Mn içeriğidir(%). ΔMn kaynak tozunun metalurjik davranışı, d ise kaynak metalindeki ana metalin oranıdır(%). Kaynak metalindeki Si miktarı da benzer şekilde hesaplanabilir[Şirin, 2004].

$$\% Mn_{kaynak} = \%(1-d)(Mn_{tel} + \% \Delta Mn) + \%(d.Mn_{metal}) \quad (2.14)$$

Oksijen katılmış kaynak metalinin içinde hemen çözünmez ve 0,1 – 5 mikron çapında kalıntı oluşumuna neden olur. Kaynak metalinin soğuma sırasındaki faz dönüşümleri bu tür oksijen kalıntılarının varlığından etkilenir. Bu nedenle, kaynak tozunun oksijen potansiyeli son derece önemlidir. Kaynak tozundaki oksijen potansiyeli, kaynak sırasında alaşım elementlerinin kaybını ya da kazancını etkilemekle kalmaz aynı zamanda, kaynak metalinin oksijen içeriğini katılma sonrası kaynak bölgesindeki oksijen kalıntılarının miktarını, boyutlarını ve türünü belirler. Yüksek oksijen potansiyeline sahip olan asidik karakterdeki tozlar, oldukça yüksek oranda SiO_2 ve MnO içermekte olup, kaynak metalinde 600 – 1000 ppm gibi yüksek bir oranda oksijen içeriğine neden olurlar. Ancak, yüksek oranda SiO_2 içeren tozlar, kaynak sırasında akım – gerilim karalılığı ve kaynak geometrisi açısından oldukça elverişlidir. Düşük oksijen içerikli bazik tozlar ise yüksek oranda CaO , CaF_2 , ve Al_2O_3 içermekte olup, kaynak metalinde 250-400 ppm düzeyinde bir oksijen içeriğine yol açarak, kaynak metalinde yüksek tokluk özelliklerinin elde edilmesine olanak sağlarlar.

Standartlar yardımı ile ele alınan herhangi bir toz için verilen sembolik gösteriliştten yararlanarak, toz üretim yöntemi, kimyasal karakteri, dikişe geçişinde kayıp veya artımlar, malzeme ve kaynak pozisyonlarına uygunluk, uygun akım türü ve şiddeti, seçilmesi gereken tel ve toz kombinasyonu, kaynak uygulama türü, tozun tane büyüklüğü gibi bilgilere ulaşma olanağı vardır. Kaynak tozları kimyasal bileşenlerine göre EN 760 standartlarında aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

MS - Mangan silikat türü tozlar: ($\text{MnO} + \text{SiO}_2 > \% 50$, $\text{CaO} < \% 15$). Asit karakterli tozlar grubunda olup, kaynak dikişinde Mn artışına neden olur. Yüksek kaynak hızları ve ısı girdisi için uygundur. Ancak, O_2 içeriği yüksek olduğu için tokluk özelliği iyi değildir. Paslı yüzeylerde bile gözenek oluşumuna karşı dirençlidir.

CS - Kalsiyum silikat türü tozlar: ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 > \% 55$, $\text{CaO} + \text{MgO} < \% 55$). Kaynak dikişinde Si artışı yaratır. Çok pasolu kaynak işlemlerine uygun değildir.

ZS - Zirkonyum silikat türü tozlar: ($\text{ZrO} + \text{SiO}_2 + \text{MnO} < \% 45$, $\text{ZrO}_2 < \% 15$). Temiz yüzeylerde yanma olduğu oluşturmaksızın yüksek kaynak hızlarına olanak sağlar.

RS - Rutil silikat türü tozlar: ($\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2 < \% 50$, $\text{TiO}_2 < \% 20$). Kaynak metaline oldukça yüksek oranda Si geçişi sağlarken, belirli bir oranda Mn kaybına neden olurlar. Bu nedenle, yüksek ya da orta manganlı teller ile eşleştirilirler. O_2 içerikleri yüksek olduğu için tokluk özelliği iyi değildir. Tek ya da çok pasolu kaynak uygulamalarında, yüksek akım yüklenebilme özellikleri nedeni ile yüksek kaynak hızlarına uygundur. Çelik boru üretiminde yaygın olarak kullanılırlar. AR-Alüminat rutil türü tozlar: ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 > \% 45$). Yüksek kaynak hızlarına uygun olup cüruf çözünme özelliği çok iyidir. Kaynak metaline belirli bir oranda Mn ve Si geçişi sağlar. Oksijen içeriği yüksek olduğundan, mekanik özellikleri orta düzeydedir. Hem DC hem de AC akım türünde tek ya da çok pasolu kaynak uygulamalarında kullanılabilir.

AB - Alüminat bazik türü tozlar: ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} > \% 45$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > \% 20$). Hafif bazik esaslı toz olup dikişte orta düzeyde Mn artışı yaratır. Elde edilen dikişin çatlama duyarlılığı düşük olup, çok pasolu kaynak işlemlerinde oldukça iyi tokluk ve mukavemet özellikleri sağlar. Özellikle, boru üretiminde ince taneli düşük alaşımlı çeliklerin kaynağında kullanılır.

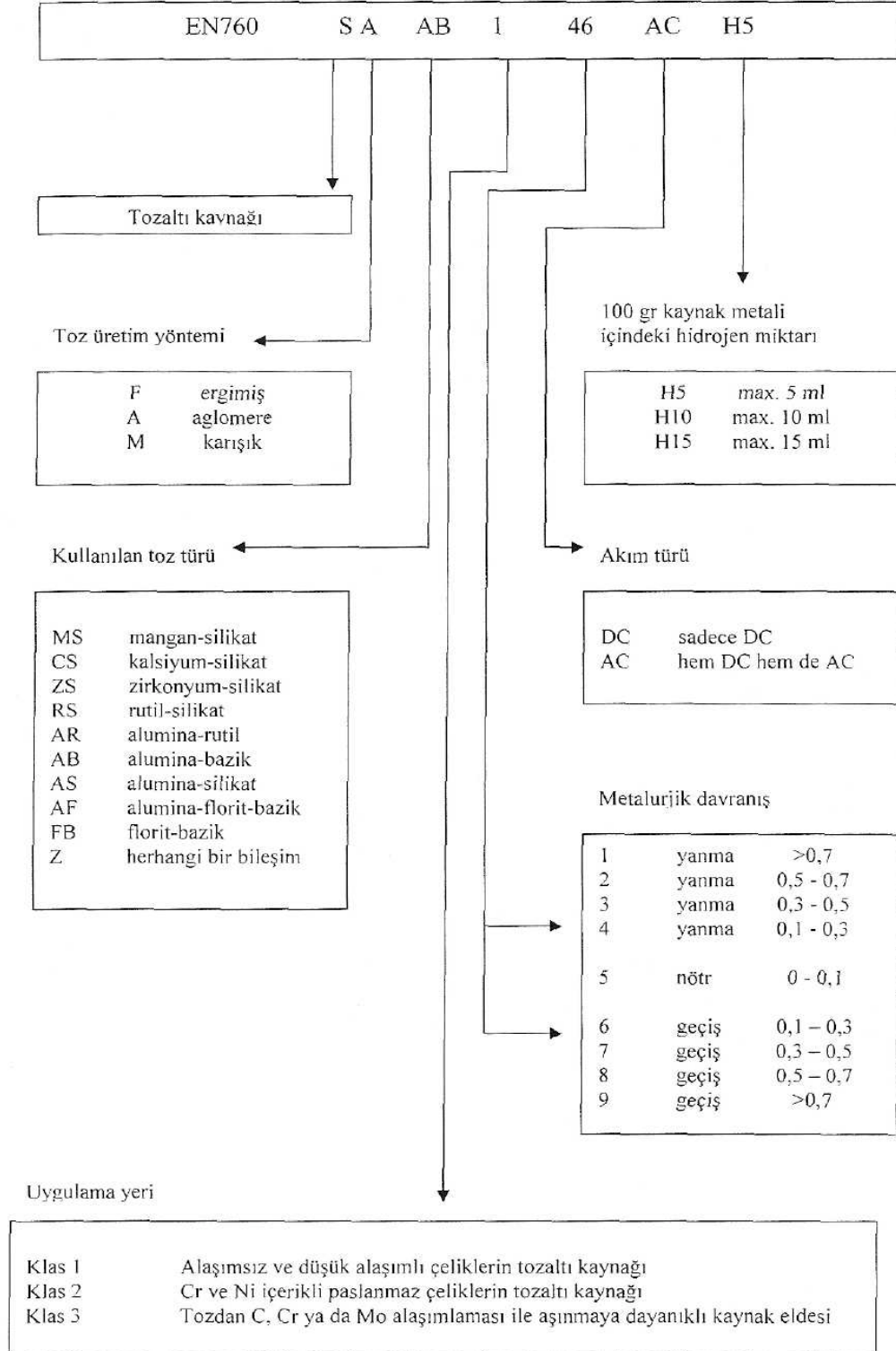
AS - Alüminat silikat türü tozlar: ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{ZrO}_2 < \% 40$, $\text{CaF}_2 + \text{MgO} < \% 30$, $\text{ZrO}_2 < \% 5$). Oldukça yüksek oranda bazik bileşenler içeren bir tozdur. Genel olarak nötr karakterli toz grubuna girse de kaynak metalinde belirli bir Mn kaybı yaratır; bu nedenle, yüksek mangan içerikli tellerde kullanılır. Oldukça temiz ve düşük oksijen içerikli kaynak eldesine olanak sağlar. Bazik özelliği nedeni ile cüruf akışkanlığı azdır; bu nedenle, yüksek kaynak hızlarına uygun değildir.

AF - Alümina florit bazik türü tozlar: ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaF}_2 < \% 70$). Nötr karakterli toz grubunda olup, alaşımlı tellerle birlikte kullanılır. AB tipi tozlara karşın daha yüksek bir ark gerilimi ile çalışmayı gerektirir.

FB - Fluorid bazik türü tozlar: ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{CaF}_2 > \% 50$, $\text{SiO}_2 < \% 22$, $\text{CaF}_2 > \% 15$). Düşük miktarda Si ve oksijen içeren bazik esaslı tozlardır. Tokluk özelliği yüksek, çatlama duyarlılığı düşük dikiş oluşturur. Bazik özelliği nedeni ile cüruf akışkanlığı az olup cürufun yüzeyden ayrışması problemi olabilir; bu nedenle, yüksek kaynak hızlarına uygun değildir. Kaynak metalinde Mn kaybı yarattığı için yüksek Mn içerikli tellerle eşlendirilir.

Kaynak tozlarının fiziksel özellikleri

Tozaltı kaynağında kullanılan tozların, kaynak sırasında bir takım fiziksel etkileri vardır. Örneğin, kaynak dikişinin biçimlenmesinde, ergiyen ve cüruf haline geçen tozun rolü büyüktür. Burada, yığılan tozun özgül ağırlığı, tane büyüklüğü, ergime aralığı, akışkanlığı ve gaz geçirme yeteneği oldukça önemlidir. Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak tozlarının ani ısınma sırasında gösterdikleri ergime davranışlarının gözlenmesi ve ölçülmesi için yapılan araştırmalarda kaynak tozunun ergime sıcaklık derecesi, ergime sonrası değişik sıcaklıklardaki akışkanlığı, yüzey gerilimleri, ergimiş durumdaki yoğunluğu, elektriksel iletkenliği ile soğuma sırasındaki ısıl büzülme davranışları incelenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda, çok değişik tür ve özellikteki tozlar arasında söz konusu fiziksel özellikleri açısından büyük farklılıklar olmadığı saptanmıştır.



Şekil 2.13. EN 760 standardına göre kaynak tozlarının gösterimi

Kaynak tozunun hem ergime sıcaklık derecesi hem de ergimiş tozun yoğunluğu kaynak metalinden düşük olmak zorundadır. Bu nedenle, kaynak tozları oda sıcaklığında elektriksel açıdan yalıtkan özelliğe sahip olup, artan sıcaklıkla birlikte tozun elektriksel direnci azalır ve kaynak sıcaklığında iletken hale gelir. Genel olarak, kaynak tozlarının yumuşama sıcaklığı 1325 °C, ergime sıcaklığı ise 1500 °C dolaylarındadır. Bazik tür toz cürufun soğuma sırasındaki ısı büzülme katsayısı çeliğe çok yakındır. Asidik tozlarda ise bu değer, çeliğe kıyasla % 10 daha azdır. Bu nedenle, bazik tür toz cürufları çelik yüzeyinden daha zor ayrılır.

Kaynak banyosu üzerindeki toz örtüsünün, atmosferik gazları geçirmeyecek ve kaynak banyosunda akıntı yaratmayacak düzeyde akışkanlığa sahip olması gerekir. Kaynak tozunun kaynak banyosu üzerinde koruyucu bir örtü oluşturabilmesi için, yüksek sıcaklıklarda akışkan, kaynak sonrası oluşan cürufu temizleyebilmek içinse oda sıcaklığında kırılğan olması gerekir. Ergimiş tozun akışkanlığı yaklaşık olarak ergimiş çeliğin akışkanlığı ile aynıdır. Ancak, MS türü cürufun akışkanlığının CS türü toz cürufa kıyasla daha büyük olması nedeni ile yüksek hızlarda MS türü tozlar kullanılır. Kaynak sırasında çıkan gazların, kaynak metali katılaşmadan önce dikişi terk etmesi gerekir. Aksi takdirde, dikişte kalan gazlar gözeneklere bazen de çatlak oluşumuna neden olabilir. Gazların kaynak metalinden tamamen çıkmalarına etki eden en önemli faktörlerden biri de kullanılan tozun tane büyüklüğüdür. Tane büyüklüğü küçüldükçe, gazların çıkış kabiliyeti de azalır. Kaynak hızının yükselmesi durumunda, orta veya iri taneli bir tozun kullanılması yararlıdır. Zira, hızlı yapılan kaynakta ergiyen banyo küçük olup, çabuk katılaşacağından, gazların da çok kısa zamanda dikişi terk etmeleri gerekir. Bu da ancak, iri taneli toz kullanımı ile sağlanabilir. Tane büyüklüğü arttıkça, nüfuziyet ve dikiş az miktarda azalmakta genişlik ise artmaktadır.

Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak tozlarının yeterli düzeyde kuru olması gerekir. Toz paketi açıldığı ya da bir şekilde yırtıldığı zaman vakit geçirmeksizin kuru ve kapalı bir hacim içine alınmalıdır. Açıkta kalan tozlar için, özellikle ani sıcaklık düşümünün olduğu anlarda (güneş batımı sonrası) yoğunlaşma dolayısıyla

tozun nem alma tehlikesi oldukça fazladır. Toz kurutma işlemi minimum 260 °C sıcaklıktaki uygun bir kap içinde ve tüm toz kütlesinin bu sıcaklığa erişebileceği yeterli bir süre boyunca yapılmalıdır. Toz bu sıcaklıkta en az iki saat süre ile tutulmalıdır. Tozdaki nem miktarının fazlalığı toplam kurutma süresi gereksinimini artırabilir. Kurutma sıcaklığının 480 °C'yi aşmaması önerilir.

Genel olarak, kurutma işlemi ergimiş tozlar için 200-300 °C ve iki saat, aglomere tozlar içinse 300-400 °C ve üç saat olarak önerilmektedir. Tozdaki nem derecesine göre, kaynak metalindeki hidrojen içeriğinin artması ile çatlak tehlikesi artar ve dikişin iç kısımlarında gözenek oluşur. Nem miktarının çok yüksek olması durumunda ise dış kısımda da gözle görülebilecek düzeyde gözenek oluşur. Yağ, gres ve boya gibi organik kalıntılar ile pas ve tufal gibi metalik kalıntılar gözenek oluşumuna neden olur. Bu nedenle, kullanılan kaynak tozunun içinde toz, pislik, tufal ve demir tozu gibi kalıntılar bulunmamalıdır. Bu amaçla, kaynak tozu sürekli bir filtrasyona tabi tutularak, hem içindeki toz, pislik ve tufal gibi yabancı maddelerden arındırılır hem de ince tanelerin elenmesi ile toz tane büyüklüğü belirli değerlerin içinde tutulur.

2.3.2. Tozaltı kaynak telleri

Tozaltı kaynak yönteminde dolgu malzemesi olarak kullanılan tel elektrotlar, elektrik ark ocaklarında üretilen, kaynak banyosunun dezoksidasyonunu sağlamak için yüksek oranda Mn içeren çeliklerdir [Şirin, 2001]. Çapları ise 1,2-12 mm arasında değişir. Tellerin yüzeyleri tamamen düz ve pürüzsüz olmalı ve yağ, pislik, pas ve tufal bulunmamalıdır. Pas ve tufal hem akım geçişini zorlaştırmakta hem de temas memelerinin çabuk aşınmasına neden olmaktadır. DIN 668'e göre, 3.2 mm çaplı kaynak teli için çap toleransı 0.06 mm iken bu değer 4.0 mm çaplı tel için 0.075 mm'dir. Tozaltı kaynak tellerinin bir diğer özelliği de, kaynak sırasında hem temas memesinden tele akım geçişini kolaylaştırması, hem de elektrotların paslanmasını önlemek amacıyla üzerlerinin bakır kaplı olmasıdır.

Çizelge 2.4. Kaynak tellerinde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri

Alaşım Elementi	%	Etkisi
C	0,05-0,25	Sertlik, çekme mukavemeti
Si	0,05-0,45	Dezoksidasyon
Mn	0,5-3,0	Sertlik, çekme - çentik - darbe mukavemeti, uzama
Mo	0,5-1,0	Isı direnci
Cr	1,0-2,9	Isı direnci, sertlik
Al	-	Dezoksidasyon
Ni	1,0-2,0	Düşük sıcaklıklara mukavemet

Çizelge 2.5. Tozaltı kaynağında kaynak tellerinin çaplarına göre çalışabileceği akım şiddeti değerleri [ASM Handbook, 1983].

Tel çapı (mm)	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	4,8	5,5
Akım (A)	115-500	125-600	150-700	220-1000	340-1100	400-1300	500-1400

Çizelge 2.6. EN 756'ya göre kaynak tellerinin kimyasal bileşimleri

Tel türü	Alaşım elementi miktarı							
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr
S1	0,05-0,15	0,15	0,35-0,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S2	0,07-0,15	0,15	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S3	0,07-0,15	0,15	>1,30-1,75	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S4	0,07-0,15	0,15	>1,75-2,25	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S1Si	0,07-0,15	0,15-0,40	0,35-0,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S2Si	0,07-0,15	0,15-0,40	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S2Si2	0,07-0,15	0,15-0,60	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S3Si	0,07-0,15	0,15-0,40	>1,30-1,85	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S4Si	0,07-0,15	0,15-0,40	>1,75-2,25	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S1Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	0,35-0,60	0,025	0,025	0,45-0,65	0,15	0,15
S2Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,025	0,025	0,45-0,65	0,15	0,15
S3Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	>1,30-1,75	0,025	0,025	0,45-0,65	0,15	0,15
S4Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	>1,75-2,25	0,025	0,025	0,45-0,65	0,15	0,15
S2Ni1	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,80-1,20	0,15
S2Ni1.5	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,020	0,020	0,15	>1,20-1,80	0,15
S2Ni2	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,020	0,020	0,15	>1,80-2,40	0,15
S2Ni3	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,020	0,020	0,15	>2,80-3,70	0,15
S2Ni1Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	0,80-1,30	0,020	0,020	0,45-0,65	1,20-1,80	0,20
S3Ni1.5	0,07-0,15	0,15-0,25	>1,30-1,70	0,020	0,020	0,15	>1,20-1,80	0,20
S3Ni1Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	>1,30-1,80	0,020	0,020	0,45-0,65	1,20-1,80	0,20
S3Ni1.5Mo	0,07-0,15	0,15-0,25	1,20-1,80	0,020	0,020	0,45-0,65	>1,20-1,80	0,20
S0	Üzerinde anlaşılan herhangi bir kimyasal bileşim							

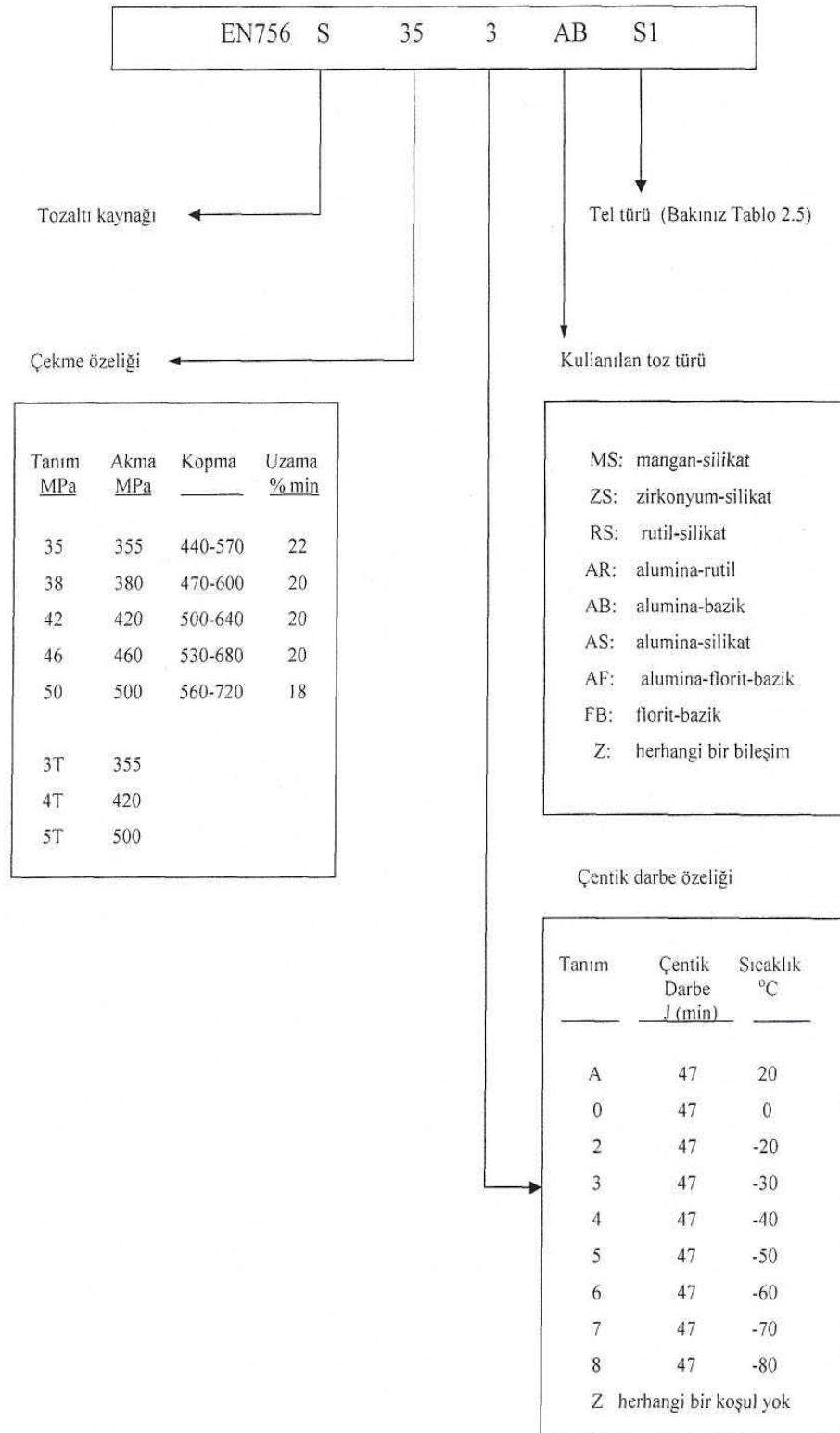
Kaynak tellerinin bileşim yönünden seçimlerinde, alaşımlama özelliği ve birlikte kullanılacağı toza uyumu en önemli etkenler olarak dikkate alınmalıdır. Amerikan standartlarında (AWS A5-17, ASTM A 558-65T) mangan miktarına göre kaynak

telleri düşük manganlı (% 0,30 - 0,60 Mn), orta manganlı (% 0,90 - 1,25 Mn) ve yüksek manganlı (% 1,75 - 2,25 Mn) olmak üzere üç grupta toplanmıştır. Kaynak tellerinin bileşiminde bulunan elementlerin % sınırları ve bunların kaynak dikişindeki etkileri Çizelge 2.4'de, tel çapına bağlı olarak kaynak tellerinin çalışabileceği akım sınırları ise Çizelge 2.5'de verilmiştir[Anık, 1991b]. EN 759'a göre kaynak tellerinin gösterimi ise Şekil 2.14'de görüldüğü gibidir.

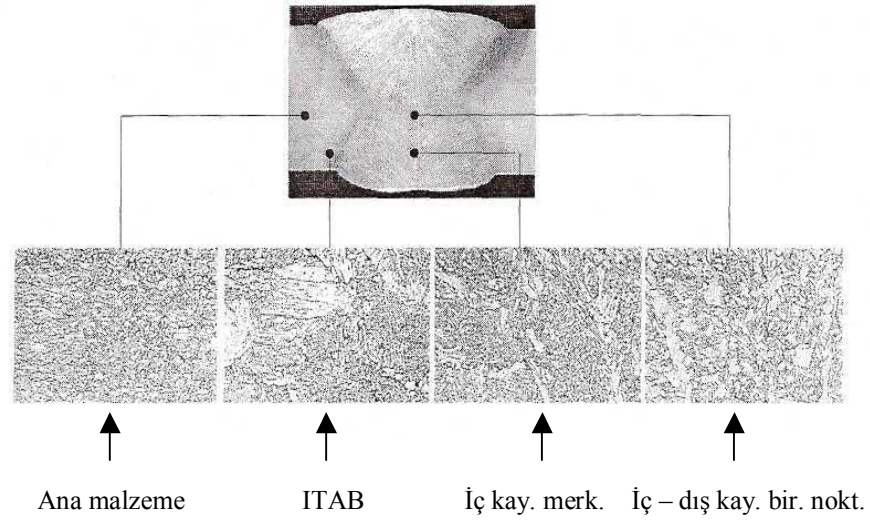
2.4. Tozaltı Kaynağında Kaynak Metalurjisi

Bir kaynak bağlantısının özelliğine etki eden faktörlerin en önemlisi, kaynak işlemi sırasında uygulanan sıcaklığın dağılım ve değişimi karşısında esas metalin davranışdır. Çok azı dışında tüm kaynak yöntemleri kaynak edilen malzemenin kaynak bölgesinin yerel olarak ergime veya metalin solidüsüne yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılmasını gerektirir, işte böyle bir sıcaklık derecesine kadar ısıtılmayı takip eden soğuma metalde bir dizi içyapı değişikliğine neden olur.

Tüm ergitme kaynak yöntemleri temel olarak bir döküm işlemine benzer. Elektrik ark kaynağında; ek kaynak metali, ark yardımıyla ergir ve daha önceden hazırlanmış olan kaynak ağzı içine dökülür. Bu arada, kaynak ağzının kenar yüzeyleri de bir miktar ergir ve dolayısıyla ergimiş kaynak metali ile esas metal karışarak kaynak ağzı içinde katılaşır. Bu işlem sırasında, kaynak edilen malzemenin kaynak dikişine bitişik kısımlarında metalin ergime sıcaklığından ortam sıcaklığına kadar değişik sıcaklık derecelerinde ısınmış olan bölgeler ortaya çıkar. Diğer bir deyişle, ısının yayılımı nedeni ile mekanik yapı ve iç yapı özellikleri itibarıyla gerek asıl metal gerekse kaynak metalinden farklı özellikler içeren bölgeler oluşur (Şekil 2.15). Kaynak bağlantısının bulunduğu ve kaynak sırasında ortaya çıkan sıcaklıktan etkilenmiş bölgelerin tümüne kaynak bölgesi adı verilir. Bu bölge, ergime bölgesi ve ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) olmak üzere iki kısımdan oluşur.



Şekil 2.14. EN 756 standardına göre kaynak tellerinin gösterimi



Şekil 2.15. Kaynak sırasında kaynak bölgesinde oluşan mikro yapısal değişimler.

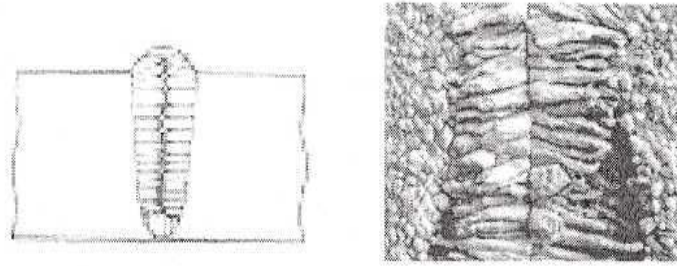
2.4.1. Kaynak bölgesinin içyapısı

Kaynak işlemi sırasında ergiyen ve sonrasında soğuyarak katılaştan bölgeye ergime bölgesi (kaynak metali) adı verilir. Metalin solidüsünden daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısınmış olan ergime bölgesi, kimyasal bileşim olarak esas metal ve ek kaynak metali karışımından oluşur [Tülbentçi, 1984]. Tek pasolu kaynak dikişlerinde, bu bölgedeki şiddetli türbülansdan dolayı esas metal ve ek kaynak metali iyice birbirine karışarak oldukça homojen bir bileşim gösterirler. Ergime bölgesindeki esas metal ve ek kaynak metali oranları tam olarak bilinse dahi, bu bölgenin kimyasal bileşiminin hesap yolu ile belirlenmesine imkân yoktur. Zira birçok alaşım elementi kaynak sırasında yanma nedeni ile kayba uğrarlar.

Karışım bölgesini çevreleyen ve esas metal ile dolgu metalinin karışımına katılmadan katılaştan ve yalnız esas metalden oluşan bir bölge daha vardır. Bu bölgeye karışmamış bölge adı verilir. Tüm kaynak yöntemlerinde oluşan bu bölgenin kalınlığı, kaynak yöntemine ve soğuma hızına bağlı olarak 0,05 ile 2,5 mm arasında değişmektedir. Özellikle, dolgu metali ile esas metalin kimyasal

bileşiminin farklı olduğu durumlarda, bu bölge parlak bir renge sahip olup görsel olarak daha da belirginleşir.

Ergiyen bölgenin katılaşması, kendini çevreleyen esas metale ısı iletimi ile olur. Isı ergiyen bölgeden esas metale doğru çok hızlı bir şekilde aktığından dolayı, esas metale yakın olan bölgelerde aşırı soğuma sonucunda çok sayıda çekirdek oluşur. Bunların birbirlerini, herhangi bir yöne doğru serbestçe büyüme bakımından, engellenmesi nedeniyle ince ve aynı zamanda yuvarlak taneler oluşur. Tek pasolu kaynak bağlantılarında dendiritik taneler sıvı/katı faz sınırına dik olarak kaynak banyosu ortasına doğru büyüler ve malzeme içinde bulunan katışıkları dikiş ortasına doğru ötelerler(Şekil 2.16). Bu katışıklar, çoğunlukla metal olmayan fazlardır. Özellikle, kalın parçalardaki derin nüfuziyetli kaynaklarda bu iri tanelerin birleştiği yerde yani ortadaki kısımda, segregasyondan dolayı bir boşluk ve dolayısıyla bir zayıflama oluşur. Bu durumda, bu bölgedeki tokluk değeri azalır ve çoğunlukla sıcak çatlaklar bu bölgede oluşur.



Şekil 2.16. Ergime bölgesindeki tanelerin durumu.

Metalik malzemeler bir kaynak işlemi gördükleri zaman kaynak dikişine (ergime bölgesi) bitişik olan bölge, kaynağa uygulanmış olan sıcaklık derecesinin etkisi altında kalır. Kaynağa uygulanan sıcaklık derecesinin daha doğrusu ısı çevrimin etkisi altında kalarak, iç yapı değişikliğine uğrayan ergime bölgesine bitişik olan bu bölgeye “ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB)” adı verilir. ITAB ergitme kaynağının bir sonucu olup kaçınılması olanaksızdır; boyutları ise kaynak sırasında uygulanan ısı

girdisine, soğuma hızına, parça boyutlarına ve malzemenin ısı iletim katsayısına bağlı olarak değişir. Bu etkilerden değiştirilmesi imkân dâhilinde olanlar yardımı ile ITAB bir dereceye kadar kontrol altına alınabilir.

Kaynak sırasında ITAB bölgesinde önce hızlı bir ısınma ve sonrasında malzeme kalınlığına ve uygulanan ısı girdisine bağlı olarak hızlı bir soğuma oluşur. Çeliğin bileşimine göre, sertleşme eğilimi olan çekirdeklerde soğuma hızı kritik soğuma hızını aştığı anda genellikle ITAB bölgesinin 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkmış olan bölgelerinde martenzitik karakterde sert ve kırılgan bir yapı ortaya çıkar. Bu bölge bağlantının en zayıf bölgesi olup bir çok çatlama ve kırılma bu bölgede meydana gelir. Karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde kaynak sırasında oluşan ısı değişimlerin yarattığı en önemli etki, malzemenin ısıdan etkilenen bölgesinin sertleşme derecesine bağlı olarak, tokluk mukavemetinin ve hidrojen gevrekliğinin olumsuz yönde değişmesidir. Sertlik ve sertleşebilme kabiliyeti anlam olarak birbirinden çok farklı iki kavramdır. Sertlik genel olarak çeliğin içerdiği C miktarının bir fonksiyonudur. Sertleşebilme kabiliyeti ise, çeliğin östenit bölgesinden itibaren ani olarak soğutulması sonucu ortaya çıkan martenzitik yapının oluşma kolaylığının bir ölçüsüdür. Sertleşebilme kabiliyeti düşük çelikler ancak kaynak işlemini takiben çok şiddetli bir şekilde soğutulduklarında martenzitik yapı oluştururlar. Sertleşebilme kabiliyeti yüksek çelikler ise, çok yavaş soğutuldukları durumda bile martenzitik yapıya dönüşebilirler. Çeliklerin kaynağında, ısıdan etkilenmiş bölgenin iç yapısı tane büyüklüğü açısından iri taneli bölge, ince taneli bölge, kısmen dönüşmeye uğramış bölge ve iç yapı değişikliğine uğramış bölge olmak üzere dört farklı bölge yapısı içerir. İri taneli bölge, ergime bölgesine bitişik olan ve kaynak sırasında 1150-1450 °C sıcaklığa kadar ısınan bölgedir. Bilindiği gibi, metaller yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklık derecelerinde ısıtıldıklarında tane büyümesi oluşmaktadır. Bazı taneler büyüyerek kısmen ya da tamamen küçük tanelerin yerine geçer. Tane büyüme hızı sıcaklık arttıkça artar ve metalin solidüs sıcaklığına yaklaştıkça büyüme oldukça hızlanır. İri taneli yapılar, ince taneli yapılara karşın daha gevrek ve kırılgan olduğu için istenmeyen bir durumdur.

Çeliklerde kaynak sırasında, ergime sınırına bitişik olan esas metal solidüse yakın bir sıcaklığa eriştiğinden östenit içindeki tane büyümesi oldukça fazladır. İnce taneli bölge, kaynak sırasında 900 ile 1150 °C arasında bir sıcaklığa kadar ısınan bölgedir. Bu bölgede tane büyümesine rastlanmaz; ancak, östenit oluştuğundan soğuma anındaki soğuma hızı ve çeliğin bileşimine bağlı olarak aynen iri taneli bölgede görülen içyapıya benzer bir yapı görülür. Kısmen dönüşmüş bölge, kaynak işlemi sırasında A_3 ile A_1 arası sıcaklığa kadar ısınmış olan bu bölge kısmı bir östenitizasyona uğramış olup, yapısındaki östenit miktarına bağlı olarak ilk iki bölgeyi andıran bir içyapı gösterir. A_1 'in altındaki sıcaklık derecesine kadar ısınmış olan bölgelerde ise içyapı değişikliği oluşmaz [Şirin, 2004].

2.4.2. Kaynak sırasında oluşan ısı çevrimler

Çeliklerin kaynağında, ITAB özelliklerinin önceden belirlenebilmesi için kaynak edilen malzeme bileşiminin, malzemenin kaynak öncesi uğradığı ısı çevrimlerin, kaynak sırasındaki sıcaklık dağılım ve değişiminin bilinmesi gerekir. Kaynak işlemi sırasında meydana gelen ısı değişimleri nedeni ile kaynağın malzeme üzerinde yarattığı etkileri daha iyi tahmin edebilmek için ısı çevrim hakkındaki bazı faktörlerin iyi bilinmesi gerekir. Bu faktörler, ısıtma hızı, tepe sıcaklığı, sıcaklık dağılımı, tepe sıcaklığına maruz kalınan süre ve ısınan bölgelerin soğuma hızıdır. Söz konusu bu faktörlerden ısıtma hızı ve tepe sıcaklığının etkisinde kalınan süre özellikte elektrik ark kaynağında çok dar bir alan içerisinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, kaynak bölgesindeki sıcaklığın dağılımı ve değişimi incelenirken yalnız erişilen tepe sıcaklık derecesi ve soğuma hızı göz önünde bulundurulur. Kaynak işleminde, gerek malzemenin kaynak edilmesi sırasında gerekse soğuma sırasında malzeme içinde sürekli bir ısı yayılımı söz konusudur. Şekil 2.17-a'da A-eğrisi ısı yayılımının söz konusu olmadığı durumu temsil etmektedir. Burada, kaynak bölgesindeki sıcaklık malzemenin ergime sıcaklık derecesinin üstünde olup, esas metalde herhangi bir sıcaklık artışının olmadığı kabul edilmiştir [Şirin, 2001]. Ancak, bu çok gerçekçi bir yaklaşım değildir. Enerji girdisinin aniden kesilmesi durumunda (B-eğrisi), kaynak bölgesindeki ısının daha soğuk esas metale doğru

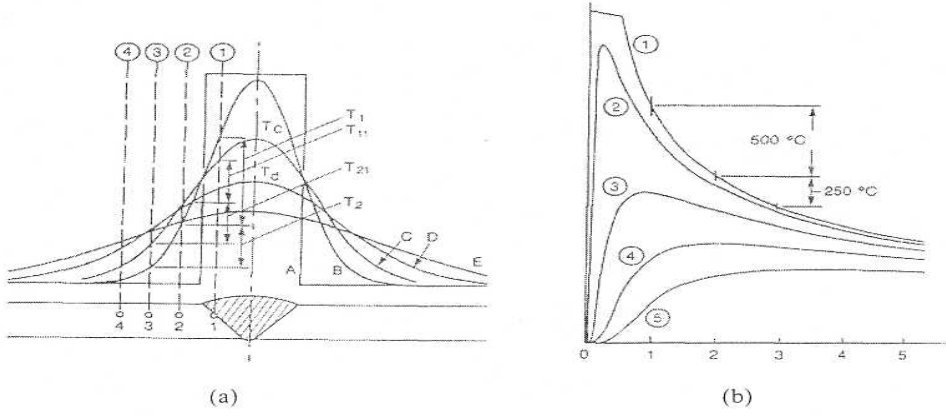
aktığı ve kaynak bölgesindeki tepe sıcaklığının düştüğü görülecektir. Benzer durum C-eğrisi içinde söz konusudur. 1 no'lu bölgedeki sıcaklık ergimiş metalden esas metale doğru oluşan ısı akışının etkisi ile hemen, hemen ergimiş bölge sıcaklığına eşittir. Ergime bölgesinden uzaklaştıkça malzeme sıcaklığı düşmektedir. 2 no'lu bölgedeki sıcaklık 1 no'lu bölgedeki sıcaklığın yaklaşık 1/3'ü kadar olup benzer durum 3 ve 2 no'lu bölgeler içinde söz konusudur.

4 no'lu bölgede ise sıcaklık artışı yoktur. Tepe sıcaklığın derecesi ısı akışında oldukça etkin bir rol oynar. B-eğrisinde 1 ve 2 noktaları arasındaki sıcaklık düşümü T_1 °C iken, C-ergisindeki sıcaklık düşümü bundan çok daha azdır (T_{11} °C). Sıcaklık dağılımının soğuma üzerindeki etkisi, Şekil 2.17 - b'deki diyagram yardımıyla daha kolay görülmektedir. Kaynak sırasındaki ısı girdisi nedeni ile, 1 no'lu bölgenin sıcaklığı ergime noktasının üzerine çıkarak bu bölge ergimiş hale geçmekte ve sonrasında da soğuma olayı gerçekleşmektedir. Burada, ergimiş bölge ile esas metal arasındaki sıcaklık farkı çok yüksek olduğu için ısı girdisinin sona erdirilmesi ile çok hızlı bir soğuma meydana gelmektedir. 2 no'lu eğriye bakıldığında, bu bölgede ulaşılan tepe sıcaklığının 1 noktasındaki sıcaklığın hemen altında bir değerde olduğu görülmektedir. 3 ve 4 noktalarında ise ısınma olayı ısı yayılımı sonucu gerçekleştiğinden, 1 ve 2 no'lu bölgelerin soğuma sürecine geçmesi ile birlikte başlamaktadır. Sonuç olarak, en yüksek soğuma hızının, sıcaklığın en yüksek olduğu noktada olduğu görülmektedir. Ayrıca, kaynak noktasından uzaklaştıkça hem tepe sıcaklığı düşmekte (dolayısıyla ısıtma ve soğutma hızları da azalmaktadır) hem de tepe sıcaklığına ulaşmak için gereken süre gereksinimi artmaktadır [Şirin, 2004].

Isı girdisi

Ergitme kaynağında ısı kaynağının temel görevi metali eritmektir. İyi bir kaynak bağlantısının elde edilebilmesi için, ısı kaynağının yeterli enerjiyi üretebilmesi gereklidir. Ark enerjisi olarak ta tanımlanabilecek olan bu enerji, hem esas metalde

yeterli ergimeyi oluşturacak kadar yüksek hem de ITAB bölgesinde istenmeyen mikroyapı değişimlerine yol açmayacak kadar düşük olmalıdır.



Şekil 2.17. a) Kaynak bölgesindeki ısınma ergisi.
b) ITAB bölgesindeki ısı yayılımı.

Metallurjik nedenlerden dolayı, hem ergitilecek malzeme miktarı minimum düzeyde tutulmalı hem de malzeme minimum enerji girdisi ile ergitilmelidir. Isı girdisinin artması ile kaynak metali ile ITAB bölgesinin tokluk ya da mukavemet değerlerinde bozulmalar oluşur. Ark kaynağında, akım üretici tarafından üretilen ark enerjisi E_s . 2.15 ile verilen formüle göre belirlenir. Ancak, arktaki kayıplar nedeni ile üretilen bu enerjinin tamamı malzemeye aktarılamaz. Birim kaynak uzunluğu boyunca ark tarafından üretilen enerjinin bir kısmı ışıma yolu ile çevreye yayılır yani iş parçasına aktarılamaz. Tozaltı kaynağında, kaynak banyosu üzerindeki koruyucu toz örtüsü sayesinde ark enerjisinin % 90-99'u faydalı enerji olarak iş parçasına aktarılmaktadır. Uygulamada birim kaynak uzunluğundaki enerji kullanımı olarak ifade edilebilecek olan "ısı girdisi" kavramı daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Eş. 2.16). Burada, H_{net} net ısı girdisini (J/mm), I kaynak akımını (A), E ark gerilimini (V), S kaynak hızını (mm/sn) ifade etmekte olup, f_1 ise ark verimi olup boyutsuz bir katsayıdır. Tozaltı kaynağı için ark verimi 0,99 olarak kabul edilebilir. İş parçasına aktarılan bu ısı girdisinin (H_{net}) ise yalnız bir bölümü malzemenin ergimesi için harcanmaktadır. Burada ise, karşımıza ergime etkinlik katsayısı (f_2) çıkmaktadır. f_2 malzemenin ergimesi için gerekli olan minimum enerji miktarının, malzemeye aktarılan toplan enerji miktarına (H_{net}) oranıdır (AWS 2001). Ergime

etkinlik katsayısı Eş. 2.17'ye göre hesaplanabilir. Burada, H_f ergime ısısı, C spesifik ısı, T_m ana metalin ergime sıcaklığı, T_0 ana metalin kaynak öncesi sıcaklığı, A kaynak dikişinin kesit alanı (mm^2) ve γ ise kaynak metalin yoğunluğu olup, çelikler için $H_f = 274000 \text{ J/kg}$, $C = 670 \text{ J/kg}$ ve $\gamma = 7,8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ olarak alınabilir [Şirin, 2004].

$$H = I \cdot E / S \quad (2.15)$$

$$H_{\text{net}} = f_1 \cdot I \cdot E / S \quad (2.16)$$

$$f_2 = [H_f + C \cdot (T_m - T_0)] \cdot A \cdot \gamma / H_{\text{net}} \quad (2.17)$$

Tepe sıcaklığı

Tepe sıcaklığı kaynak sırasında meydana gelen ısı değişimleri etkileyen en önemli etkidir. Kaynak işlemi sırasında malzemede ulaşılacak olan tepe sıcaklığı, ısı girdisine ve ısı kayıplarına bağlı olarak değişir. Isı girdi hızı, ısı kayıpları hızından yüksek olduğu sürece malzeme sıcaklığı yükselir. Her ikisinin birbirine eşit olduğu anda malzeme tepe sıcaklığına erişmiş olur. Kaynak metalinde ulaşılan tepe sıcaklık derecesi aynı zamanda ITAB bölgesindeki tane boyutları üzerinde de etkin bir rol oynar. Isı girdisi hem kaynak metalinin ergimesini hem de ergimiş bölgeden esas metale doğru oluşan ısı yayılımını karşılayacak düzeyde olmalıdır. Kaynak hızı arttırıldığı zaman yeterli ergimeyi sağlayabilmek için ısı girdisini yani kaynak akım şiddetini arttırmak gerekir. Akım şiddetinin artması, kaynak bölgesindeki tepe sıcaklığının bir miktar yükselmesine neden olur. J.R.Adams tarafından geliştirilen, alın kaynaklı sac ve plakalarda tam nüfuz etmiş tek bir paso için kaynağa bitişik ana metalde tepe sıcaklığının dağılımının formülü Eş. 2.18'de verilmiştir [Şirin, 2004]. Bu formülde $Y=0$ olduğunda, yani tam ergime sınırında, denklem $T_p=T_m$ vermektedir. Bu sonuç doğru olarak kabul edilebilir. Zira kaynak ergime sınırında tepe sıcaklığı ergime sıcaklığına eşittir. Bu formül kaynak metali için değil yalnız ITAB bölgesi için geçerli olup, ITAB bölgesindeki spesifik noktalardaki ulaşılan

tepe sıcaklığını belirlenebilmesi, ITAB genişliğinin önceden saptanabilmesi ve ITAB genişliği üzerinde ön ısıtmanın etkisinin hesaplanabilmesi amacı ile kullanılabilir. Burada, T_p tepe sıcaklık derecesini ($^{\circ}\text{C}$), T_0 iş parçasının başlangıç sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_m malzemenin ergime sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), H_{net} ısı girdisini (J/mm), t malzeme kalınlığını (mm) ve Y esas metal üzerindeki noktanın erime bölge sınırına olan uzaklığını (mm) ifade eder [Şirin, 2004].

$$1/(T_p - T_0) = 4.13 \rho C_t Y / H_{\text{net}} + 1/(T_m - T_0) \quad (2.18)$$

Soğuma hızı

Kaynak işleminde, genellikle metal önce likidüsün üstündeki bir sıcaklığa kadar ısıtılmakta ve sonra da soğutulmaktadır. Soğumanın hızlı gerçekleşmesi durumunda çeliğin kaynağını etkileyen çok önemli faz değişiklikleri oluşabilir. Alaşımsız ötektoid altı çeliklerde kritik soğuma hızı (V_{sk}) çeliğin C miktarı arttıkça ya da östenit tane büyüklüğü arttıkça azalır. Soğutma sırasında çeliğin soğuma hızı (V) kritik soğuma hızından küçükse yani $V < V_{sk}$ ise ve dönüşüm sıcaklığı T_{min} sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda tamamlanıyorsa en son yapıda herhangi bir problem oluşmaz. Buna karşılık, $V > V_{sk}$ ise yapıda martenzit adı verilen sert ve gevrek bir faz oluşur. Saf demir oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar ısıtıldığında çok sayıda yapısal dönüşüme uğrar ve iki farklı allotropik dönüşüm gösterir. Burada önem taşıyan husus, demirin çeşitli koşullarda bir kafes sisteminden diğerine geçebilme özelliğidir.

Demir normal sıcaklıklarda hacim merkezli kübik kristal kafes yapısında olup, bu halini 911°C 'ye kadar korur. Demirin bu haline α - demiri (ferrit) denir. Bu sıcaklıktan sonra, yüzey merkezli kübik kristal yapısındaki γ - demirine (östenit) 1392°C 'den sonra ise tekrar hacim merkezli kübik kristal yapısında olan δ - demirine dönüşür. Östenitte bol miktarda çözünen karbon ve diğer alaşım elementleri, soğuma sırasında ferrite geçerken ayrışmak zorundadırlar. Çözünmüş olan bu alaşım elementlerinin ferrite geçerken ayrışmalarını engelleyecek kadar

hızlı bir soğuma oluştuğunda, hem bu ayrışmalar engellenebilir hem de normal östenit-ferrit dönüşümü bozulup olay östenit-martenzit dönüşümüne çevrilebilir.

Martenzitik iç yapı demirin dengesini bozan bir yapıdır. İçinde çözünmeyen elementlerin sıkışıp kaldığı ve çıkamadığı bir ferrit kafesidir. Demir atomları zorla olmak istemedikleri yerlere itilmiş ve her atom etrafında gerilmeli bir durum yaratılmıştır ve demir böylece sertleşmiştir. Çeliğin bileşimindeki karbon miktarı ve/veya diğer alaşım elementlerinin miktarı artıkça çeliğin sertleşebilme kabiliyeti de o oranda artar. ITAB bölgesinde martenzit oluşumuna olanak vermeyen bir soğuma hızının seçilerek kaynak yapılması son derece önemlidir [Şirin, 2001].

Kaynak bölgesinin soğuması özellikle kendi soğuk bölgesine ısı iletimi ile yani ısının çelik tarafından çekilmesiyle yani “soğurmasıyla” olur. Kaynak edilen parça ne kadar kalın ise, soğrulma miktarı artacak ve soğuma hızı yükselerek ITAB bölgesinde sertleşme ve dolayısıyla martenzitik yapı oluşabilecektir. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, ITAB bölgesinde 900 °C ‘nin üzerindeki sıcaklıklara çıkmış olan kısımların dönüşüm açısından 800 ile 500 °C arasındaki soğuma hızı ile aşağı yukarı aynı hızda soğumaktadır. Bu nedenle, karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için, soğuma sırasında ITAB bölgesindeki en kritik soğuma aralığı 800 ile 500 °C arasındaki kısım olup, soğuma hızı bu sıcaklık aralığındaki süre için tanımlanan bir değerdir. Bu değer küçük olduğu durumda, soğuma hızlı olmuş demektir. Soğuma süresinin azalması sertliğin ve mukavemetin artmasına, buna karşın çatlama eğiliminin yükselmesine neden olur. Soğuma süresinin büyük olduğu durumda, soğuma yavaş olmuş demektir. Diğer bir değişle, ısı girdisinin fazla olması söz konusudur. Bu durumda, tane büyümesi oluşarak malzemenin çekme mukavemeti, akma sınırı gibi mekanik özelliklerinde azalma oluşur. Soğuma süresinin hesaplanmasında, parça kalınlığına bağlı olarak iki ve üç boyutlu ısı iletimi göz önüne alınır. Kalın parçaların kaynağında, ısı hem parça düzleminde hem de parça kalınlığı doğrultusunda yayınırken (üç boyutlu ısı iletimi), ince parçalarda ısı iletimi sadece parça düzleminde (iki boyutlu ısı iletimi) oluşur. Bu nedenle, kalın parçalarda parça kalınlığı soğuma üzerinde etkili olmazken ince

parçalarda bu etki görülmektedir (Şekil 2.18). İki ve üç boyutlu ısı iletimine göre soğuma süresine ait bağıntılar, gerekli kabuller ve düzenlemeler yapılarak Rosenthal ve Rykalin 'in katı cisimlerde hareketli noktasal ısı kaynağının varlığı kabul edilerek, kaynak bölgesindeki sıcaklık akışı yer ve zamanın bir fonksiyonu olacak şekilde ısı iletimi diferansiyel denklemlerinden geliştirilmiştir. Buna göre, üç boyutlu ve iki boyutlu ısı iletimi için soğuma süresi sırasıyla Eş. 2.19 ve Eş. 2.20'de verildiği gibidir [Şirin, 2001].

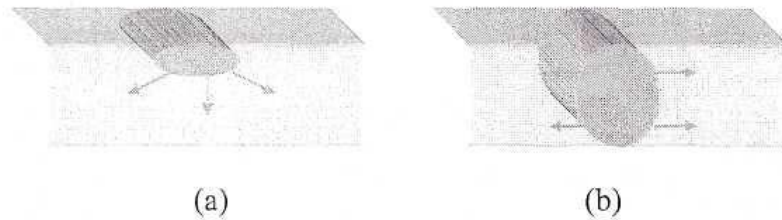
Burada, $t_{8/5}$ 800 ila 500 °C arasındaki soğuma süresinin (sn) , η bağıl termik verimi, E net ısı girdisini (j/cm), F_2 ve F_3 sırasıyla üç boyutlu ısı iletiminde dikiş faktörünü, λ çeliğin özgül ısı iletkenliğini, ρ çeliğin yoğunluğunu, c çeliğin özgül ısısını, d malzeme kalınlığını (cm) ve T_0 ortam veya ön ısıtma sıcaklığını (°C) ifade etmektedir. Kaynak yöntemine bağlı olarak alınan bağıl termik verim, tozaltı kaynağı için $\eta = 1$ 'dir. Kaynak dikiş faktörü (F_2 ve F_3) ise, kaynak ağzı yoksa 1, kaynak ağzı açılmış ise 0,9 olarak alınır. Alaşımsız ve az alaşımlı çelikler için,

$\rho = 7,85 \text{ gr/cm}^3$, $\lambda = 0,24 \text{ J/s.cm}^\circ\text{C}$ ve $c = 0,9 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$ 'dir.

Üç boyutlu ısı iletimi (kalın parça) için soğuma süresi:

$$\Delta t_{8/5} = \eta \cdot E \cdot F_3 / 2\pi\lambda [(1/ 500 - T_0) - (1/ 800 - T_0)] \quad (2.19)$$

$$\Delta t_{8/5} = \eta 2E^2 F_2 / 4\pi c \lambda \rho d^2 (1/ 500 - T_0)^2 - (1/ 800 - T_0)^2 \quad (2.20)$$



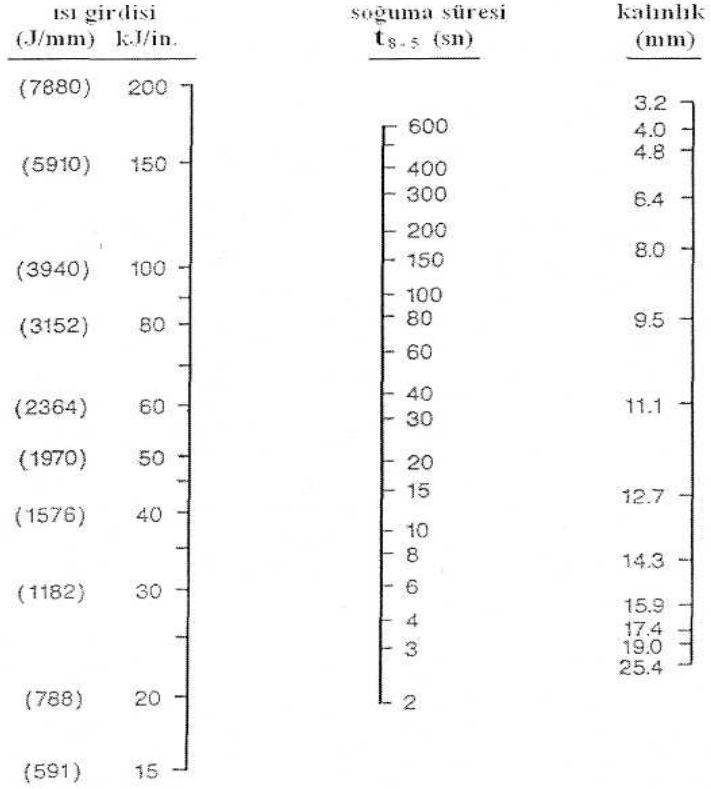
Şekil 2.18 a) Üç boyutlu ısı iletimi (kalın parça).
b) İki boyutlu ısı iletimi (ince parça).

İki boyutlu ısı iletiminden üç boyutlu ısı iletiminde geçişi gösteren kalınlığa (d_g) geçiş kalınlığı adı verilir ve Eş. 2.19 ile Eş. 2.20'nin eşitlenip düzenlenmesi ile elde edilir (Eş. 2.21).

$$d_g = \{(\eta \cdot E / 2 \cdot \rho \cdot c) / [(1 / (500 - T_0) + 1 / (800 - T_0))]\}^{1/2} \quad (2.21)$$

Isı iletiminin türüne, parça kalınlığının geçiş kalınlığı ile karşılaştırılması sonucunda karar verilir. Buna göre, malzeme kalınlığı geçiş kalınlığından küçük ise iki boyutlu ısı iletimi, aksi durumda ise üç boyutlu ısı iletimi söz konusudur (DVS, 1987). Bir diğer yol ise, her iki ısı iletimine göre soğuma süresinin hesaplanarak ısı iletim türünün ne olduğuna karar vermektedir. Her iki değerden büyük olanı fiziksel olarak daha anlamlıdır [Anık ve Bodur, 1979]. Bu nedenle, denklem 2.19'dan elde edilen değer daha büyükse ısı iletimi üç boyutlu aksi halde ise iki boyutlu demektir. Malzeme kalınlığı ve ısı girdisine bağlı olarak soğuma süresini, Şekil 2.19'da verilen nomogram yardımı ile hesaplama olanağı vardır. Soğuma hızı denklemlerinden görülmektedir ki, ana metalin başlangıç sıcaklığı, uygulanan enerji girdisi, kullanılan kaynak yöntemi, kaynak pozisyonu, malzeme kalınlığı ve kaynak ağzı soğuma biçimi soğuma hızına etki eden faktörlerdir. Ergime bölgesindeki soğuma hızının belirlenmesi, ergime ve ITAB bölgesindeki metalurjik dönüşümlerin kontrol altına alınması (özellikle, martenzitik yapı dolayısıyla soğuk çatlak oluşumunun önüne geçilmesi) ve kaynak metalindeki tane büyümesinin engellenmesi açısından oldukça önemlidir.

J.R. Adams'ta diğer araştırmacıların yaptığı gibi soğuma oranı hesaplarını ince ve kalın parçalar için ayrı ayrı yapmıştır. İki boyutlu ısı iletimi (ince parça) için soğuma hızı Eş. 2.22'de, üç boyutlu ısı iletimi (kalın parça) için soğuma hızı ise Eş. 2.23'de verilmiştir. Burada, R_{c2} ve R_{c3} sırasıyla iki ve üç boyutlu ısı iletiminde kaynak orta eksenindeki soğuma hızı ($^{\circ}\text{C}/\text{sn}$), T_c soğuma hızının hesaplandığı sıcaklıktır (550°C). Isı iletim türünün belirlenmesi sınır parça kalınlığına bağlı olarak yapılır (Eş. 2.24). Eğer, $\tau < 0,75$ ise iki boyutlu ısı iletimi, $\tau > 0,75$ ise üç boyutlu ısı iletimi söz konusudur [Yung et al, 1997].



Şekil 2.19. Kalınlık, ısı girdisi ve soğuma süresi arasındaki ilişki [Linnert, 1994].

$$Rc_2 = [2\pi k (T_c - T_i)^2] / H_n \quad (2.22)$$

$$Rc_3 = 2\pi k p c (T_c - T_i)^2 (h/H_n)^2 \quad (2.23)$$

$$\tau = h [p c (T_c - T_i) / H_n]^{1/2} \quad (2.24)$$

Karbon eşdeğeri

Kaynak işlemi sırasında, ergime bölgesine bitişik olan esas metalin ısı çevrime uğraması sonucunda belirli bir sertlik artışına uğradığı daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Buradaki sertlik artışına etki eden en önemli faktör, ana metalin kimyasal bileşimidir. Alaşımsız çeliklerin sertleşme kabiliyetleri üzerinde oldukça etkin olan başlıca elementler C ve Mn 'dır. Az alaşımlı çeliklerde ise, Cr, Mo, V ve Mn gibi alaşım elementleri düşük C oranlarında bile kaynak sonrası ITAB

bölgesinde sertlik artışına neden olurlar. Kaynak sırasında çeliğin sertleşme eğilimini belirten bir değer sayısının bulunması ve bununla çeliğin bileşimine dayanarak, kaynak kabiliyetini belirten bir formülün elde edilmesi için birçok çalışma yapılmış ve alaşım elementlerinin verdiği sertleşmeye eşdeğer sertliği sağlayacak C miktarı saptanmıştır. Bu şekilde saptanan ve çeliğin bileşimindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu sertliği veren C miktarına karbon eşdeğeri ($C_{eş}$) adı verilmiştir [Şirin, 2001].

Günümüze kadar bu konuda birçok çalışma yapılmış ve oldukça fazla sayıda karbon eşdeğeri formülü geliştirilmiştir; ancak, bunlardan en yaygın olarak kullanılanı Uluslararası Kaynak Enstitüsü Kaynak Kabiliyeti Komisyonuna (IIW) göre düzenlenmiş olan formüldür [Şirin, 2004]. Eş. 2.25’de verilen bu karbon eşdeğeri formülün geçerli olabilmesi için çelikteki alaşım elementlerinin sınırı Çizelge 2.7’deki gibi olmalıdır. CE_{PLS} formülü ile (Eş. 2.26), % 0,15 ‘den daha az C içeren boru çelikleri için Ito and Bessyo tarafından geliştirilmiş olan P_{CM} formülleri (Eş. 2.27) çelik boru sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [Şirin, 2004]. Görüldüğü gibi, karbon eşdeğeri formülü tamamen çeliğin kimyasal bileşimi ile ilgili olup, malzemeye uygulanan ısı girdisi, malzeme kalınlığı, kaynak ağzı biçimi gibi faktörleri içermemektedir.

$$C_{eş} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (2.25)$$

$$CE_{PLS} = C + Si/25 + (Mn + Cu)/16 + Cr/20 + Ni/60 + Mo/40 + V/10 \quad (2.26)$$

$$P_{CM} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mn/15 + V/10 + 5B \quad (2.27)$$

Çizelge 2.7. $C_{eş}$ (IIW) için çeliklerdeki alaşım elementlerinin üst sınırı

C	Mn	Cr	Ni	Mo
%0,5	%1	%1	%3,5	%0,6

Çizelge 2.8. C_{es} 'e göre ön tav sıcaklığının belirlenmesi

Karbon Eşdeğeri (%)	Ön Tav Sıcaklığı (°C)
<0,45	-
0,45–0,60	100–200
>0,60	200–350

Çizelge 2.9. Ön tav uygulanmadan kaynak edilebilecek maksimum parça kalınlığı değerleri

Akma sınırı (N/mm ²)	Maksimum kalınlık (mm)
315–355	30
385–420	20
460–500	12
>590	2

Uluslararası Kaynak Enstitüsü çatlamaya karşı bir emniyet olarak kaynak sonrası ITAB bölgesindeki sertliğin 350 HV'yi aşmamasını önermektedir. ITAB bölgesinde sertlik artışını kontrol edebilmek için yaygın olarak yapılan uygulama, kaynak öncesi parçaya ön tav yapılması ve kaynak işleminin bu sıcaklık derecesinde gerçekleştirilmesidir. Bir yapı çeliğine uygulanacak olan tavlama karbon eşdeğerine bağlı olarak belirleyen bazı formüller geliştirilmiş olsa da emin yol Çizelge 2.8 'de verilmiş olan değerleri uygulamaktadır. İnce taneli yapı çeliklerinin kaynağında +5 °C'nin altındaki sıcaklıklarda parçaya 80–200 °C 'lık bir ön tav uygulanır. Bu sıcaklığın üzerindeki çalışmalarda, parçaya ön tav uygulanıp uygulamama konusunda malzemenin akma sınırı ve parça kalınlığı bir kriter olarak kullanılır (Çizelge 2.9).

Kaynak kabiliyeti bakımından çelikleri üç ayrı grupta değerlendirme olanağı vardır; iyi bir kaynak kabiliyetine sahip olan çelikler, bilinen tüm kaynak yöntemleri ile hiçbir özel önlem gerektirmeksizin kaynak edilebilirler. ITAB bölgesinde tane büyümesi dışında bir yapı değişikliği ve sertleşme oluşmaz. Bu özellik, genellikle $C_{es} < \% 0,45$ olan çeliklerde vardır. Orta derecede kaynak kabiliyetine sahip olan

eliklerde güvenli bir kaynak bağlantısı elde edebilmek için, kaynak yöntemi ve malzeme seçimine dikkat edilmeli ve uygun bir n tav sıcaklığı uygulanmalıdır. Bu gruba giren çeliklerin karbon eğdeğeri % 0,45 ile 0,60 arasındadır. Kötü derecede kaynak kabiliyetine sahip olan elikler ($C_{eş} > \% 1$ olan yüksek alaşımlı ve karbonlu çelikler) ise, özel ek kaynak metali kullanılarak, oldukça yüksek bir n tav sıcaklığı ve kontrollü bir soğutma ile kaynak edilirler. Genellikle ITAB bölgesindeki sertlik değeri garanti edilemez [Yıldız, 2000].

2.5. Tozaltı Kaynağında Oluğan Kaynak Hataları

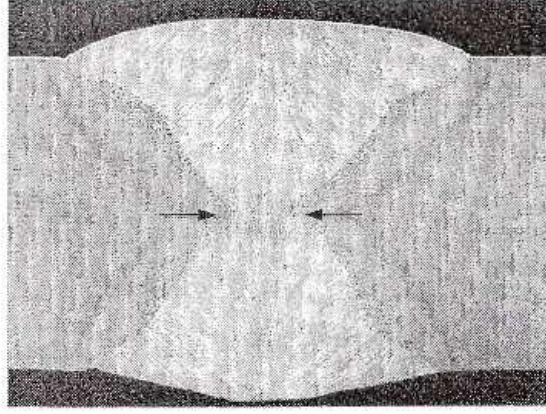
Tüm kaynak yöntemlerinde olduğu gibi tozaltı kaynağında da kaynak parametrelerinin uygun seçilmemesi, uygun olmayan ek kaynak metali veya kaynak tozu kullanımı ve kaynak tekniğinin kötü uygulanması sonucunda istenmeyen bir dizi kaynak hatası ile karėılaėılması olasıdır. Tüm kaynak hataları, kaynak dikiğinde bir zayıflama ve süreksizlik oluğturarak bağlantının kullanımı sırasında geri dnğ olanaksız çatlak, kırılma ya da performans eksikliğine neden olabilir. Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikiğli boru üretiminde en çok karėılaėılan hata türleri; gözenek, yanma oluğu, kalıntı, nüfuziyet yetersizliği, çatlak oluğumu ile geometrik (bindirme, dikiğ kaçıklığı vb.) hatalardır.

2.5.1. Nüfuziyet yetersizliği

Nüfuziyet bağarılı bir kaynağın temel ėartıdır ve nüfuziyet esas olarak kaynak bağlantısındaki ergime derinliğidir. Yani; esas metalin ilk yüzeyi ile ergimenin bittiği noktalar arasındaki mesafedir. Kaynak sırasında, ergimenin bütün malzeme kalınlığınca aynı olmaması sonucunda bağlantının alt kısımlarında kırılmaya neden olabilecek oyuk ve çentikler oluğur (ėekil 2.20).

Nüfuziyet yetersizliği öncelikle dikiğin yorulma mukavemetini önemli bir lde dğrr ve dikiğ eğilmeye zorlandığında kökteki oyuk ve çentikler bağlantının

kırılma eğilimini arttırarak, bağlantının bu kısımdan çatlamasına ve sonrasında kırılmasına yol açar.



Şekil 2.20. Nüfuziyet yetersizliği

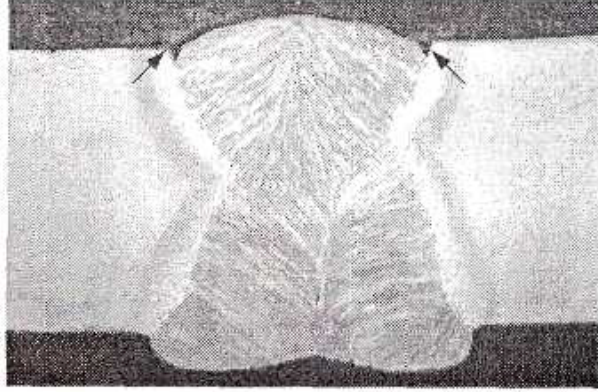
Tek pasolu alın kaynağında nüfuziyet derinliği, malzeme kalınlığının % 80'ini geçerse kaynak sırasında malzemenin delinme tehlikesi artar. Gereğinden kalın bir tel kullanılması durumunda ya da düşük akım şiddeti ile çalışması halinde nüfuziyet derinliği azalır ve nüfuziyet yetersizliği oluşabilir. Ayrıca, kaynak ağzının hatalı açılması da bu hataya yol açabilir.

2.5.2. Yanma oluğu (çentik)

Bu hata, kaynaktan sonra esas metalde veya kaynak metalinde oyuk ve çentik biçiminde kendisini gösterir. Söz konusu bu oluklar dikiş boyunca sürekli veya kesintili bir şekilde devam eder (Şekil 2.21). Yanma olukları, kaynak dikiş kesitini zayıflattıklarından ve çentik etkisi yaptıklarından dolayı, özellikler dinamik zorlamalarının etkisinde kalan bağlantılarda bulunmaları istenemez. Bütün ark kaynak yöntemlerinde karşılaşılan yanma oluğunun oluşum nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Akım şiddetinin ve/veya ark geriliminin çok yüksek olması

2. Kaynak hızının çok yüksek olması nedeni ile ergimiş ilave metalin kaynak ağzını tam olarak dolduramaması,
3. Tel eğiminin (kafa açısı) uygunsuz olması ya da tel besleme hızının düzensiz olması nedeni ile ek kaynak metali yığılmasında düzensizliklerin oluşması.



Şekil 2.21. Yanma oluğu

2.5.3. Gözenek oluşumu

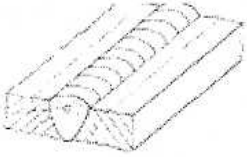
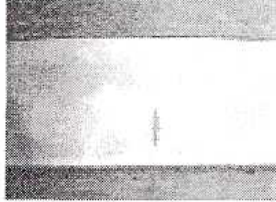
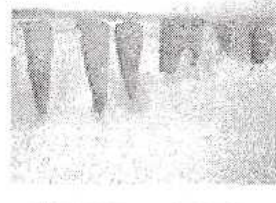
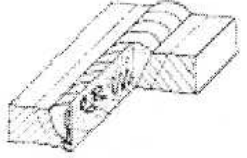
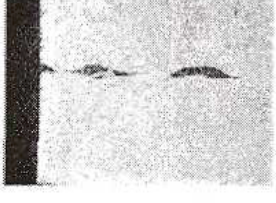
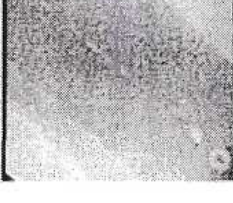
Çok çeşitli nedenlerle oluşabilen gözenekler kaynak banyosunda sıkışıp kalan gazların oluşturduğu boşluklardır. Bunlar gaz kabarcığı denilen tek tek yuvarlak veya gaz kanalı olarak adlandırılan uzunlamasına boşluklar halinde dikiş içinde yer alırlar (Şekil 2.22). Bir kaynak dikişinin içinde bulunan gözenekler, dikişin taşıyıcıyı kesitinin azalmasına yol açtığından dolayı mukavemet değerlerini düşürür ve aynı zamanda yerel gerilme birikimlerine neden olur. Bu durumda bağlantının mekanik özelliklerinin kötüleşmesine yol açar. Gözenekler, özellikle yorulma mukavemetini azaltıcı yönde etki gösterirler. Kaynak metali içinde dağılmış olarak bulunan küçük gözenekler birleştirmenin statik mukavemetini çok fazla etkilemezler. Ancak, yüksek dinamik mukavemet istenen konstrüksiyonlarda gözenek oluşumuna izin verilmez [Şirin, 1997]. Tozaltı kaynağında, gözenek oluşumuna neden olan elementleri kısaca aşağıdaki gibi açıklamak olasıdır:

1. Yüksek kükürt içerikli kaynağa yatkın olmayan çelik kullanımı,

2. Uyumsuz tel ve toz kombinasyonu ile çalışılması,
3. Serbest tel ucunun fazla uzun olması. Deneyimler temas memesi ile iş parçası arasındaki uzaklığın kısılması ile daha kararlı ve sabit bir arkın elde edildiğini göstermiştir. Tel eğiminin uygunsuz olması da gözenek oluşumuna yol açar.
4. Kaynak tozunun nemli olması nedeni ile kaynak banyosuna nem taşınması,
5. Çok yüksek veya çok düşük ark gerilimi ile çalışılması,
6. Kaynak hızının aşırı yüksek olması ya da ısı girdisinin düşük olması nedeni ile gazların kaynak banyosunda dışarıya çıkacak zamanı bulamadan kaynak metalinin katılaşması ve gazların katılaştıran kaynak metali içinde hapis olması; diğer bir ifade ile hızlı soğuma durumunda, gazların (H_2 , CO , N_2 veya H_2O) yüzeye çıkmasının engellenmesi ile katılaştıran kaynak metalinde kalmaları ile gözenek türü kaynak hatası oluşur.
7. Toz yüksekliğinin uygun olmaması. Kaynak yaparken yığılan tozun yüksekliği, arkı tam örtecek şekilde ayarlanmalıdır. Eğer, yığılan tozun yüksekliği az ise dikiş gözenekli olur. Tozun yüksekliğinin fazla olması halinde de, gazların dikişten dışarıya çıkması zorlaşır; bu da, gözenek oluşumuna neden olur.
8. Tel, toz veya iş parçasının yüzeyinin kirli olması. Yağ, gres ve boya gibi organik kalıntılarla ile pas ve tufal gibi metalik kalıntılar da gözenek oluşumuna neden olurlar. Bu nedenle, kullanılan kaynak tozunun içinde toz, pislik, tufal ve demir tozu gibi kalıntılar bulunmamalıdır. Bu amaçla, kaynak tozu sürekli bir eleme ve temizlemeye tabi tutulur. Kaynak ağızlarında giderilemeyen bir kalıntı olması halinde, kaynak hızı düşürülerek gazların kaynak banyosun katılaşmaya kadar dışarıya çıkabilmesi için yeterli zaman oluşturulur. Bu gibi durumlarda, yüksek miktarlarda dezoksidasyon elenti içeren kaynak telleri de kullanılabilir.
9. Ark üflemesi de gözenek oluşumuna yol açar.

2.5.4. Kalıntılar

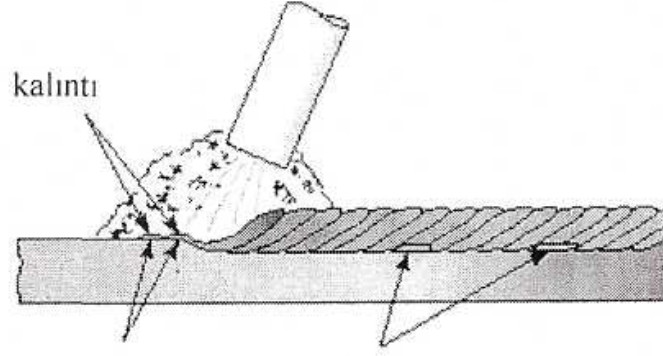
Kalıntılar gerek kaynak kesitini zayıflatmaları gerekse de çatlak başlangıcına neden olduklarından varlıkları arzu edilemez.

Hatanın şematik gösterimi	Makro görüntüsü	X-Ray görüntüsü
 gözenek		
 gözenek zinciri		
 gözenek kanalı		

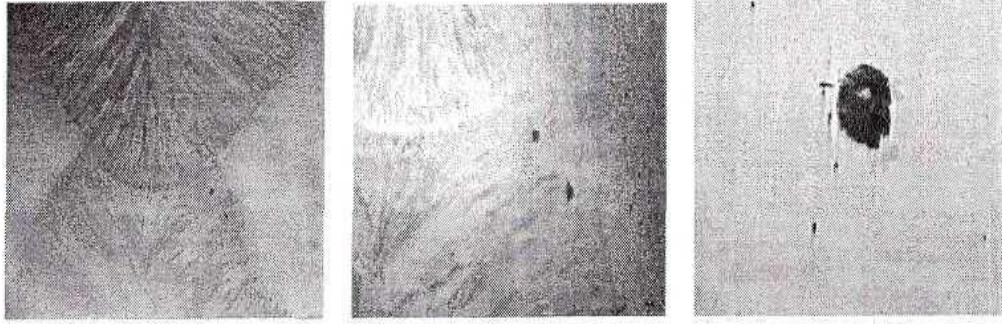
Şekil 2.22. Gözenek türü kaynak hataları.

Ergimiş kaynak banyosunu dezokside etmek ve yabancı maddelerden arındırmak amacı ile kaynak tozu içinde bulunan elementler kaynak süresince oksitler, nitrürler ve yabancı maddelerle reaksiyonuna girerler. Normalde cüruf olarak adlandırılan bu bileşikler düşük yoğunlukların ve katılaşma sıcaklıkları nedeniyle kaynak işlemi süresince yüzeye doğru hareket ederler ve yüzeyde cüruf tabakası oluştururlar. (Şekil 2.23). Hızlı soğuma durumunda (yetersiz ısı girdisi), cüruf kalıntısı kaynak banyosunun erken katılaşması nedeniyle metal yüzeyine ulaşamaz ve dikişin içinde kalarak hata yaratır. (Şekil 2.24) Kaynak telinin doğrultulmasında problem olması, telin kaynak noktasına kesintili bir biçimde gelmesi, uygun olmayan kaynak ağzı tasarımı ile tufal, pas ve yağ gibi yabancı maddelerin varlığı kalıntı oluşumunu arttıran etkenler arasındadır. Cürufun elektroda doğru akması da cüruf kalıntısına neden olur. Ancak, bu durumda soğuma hızının artırılması yani daha hızlı bir

soğumanın sağlanması gerekir. Ayrıca, daha az akıcı ve iri taneli toz kullanımı tercih edilir ve kaynak ağız açısı büyütülür.



Şekil 2.23. Kalıntı türü hatanın oluşumu



Şekil 2.24. Kalıntı türü kaynak hatasının görünümü

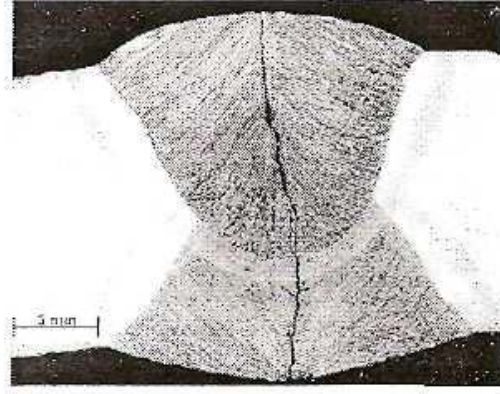
2.5.5. Çatlak oluşumu

Bu hata diğer hatalara karşı en tehlikeli olanıdır (Şekil 2.25). Dış zorlamaların türü ne olursa olsun çatlaklar sürekli olarak bağlantının mukavemet değerini düşürür; bu bakımdan, kaynak dikişinde çatlığa hiçbir şekilde izin verilmez. Çatlağın olduğu yer, çatlak oluşum nedeniyle ilgili olarak önemli ipuçları vermektedir. Eğitim kaynağında çatlığa kaynak metalinde (genellikle sıcak çatlak) ve ısıdan etkilenmiş bölgede (genellikle soğuk çatlak) rastlanır. Çatlaklar oluşum zamanlarına göre “sıcak çatlak” ve “soğuk çatlak” olmak üzere iki gruba ayrılır. Sıcak çatlaklar

kaynak banyosu katılaşmaya başladığı anda, soğuk çatlak ise kaynak banyosu katılaştıktan sonra (hatta haftalar sonra) ortaya çıkar.

Sıcak çatlak oluşumu

Katılaşan kaynak metalinde oluşan tipik bir hasar biçimidir, bu tür çatlaklar likidüs ve solidüs sıcaklıkları arasındaki bölgede katılaşmadan hemen önce ortaya çıkar. Kaynak metali soğuma sırasında büzülme yada diğer bir deyişle kendini çekme eğilimi gösterir. Bu durumda, kaynak metali yeteri kadar sünek değilse ve kaynak edilen parçaların birbirine göre hareket etme imkânları sınırlı ise sıcak çatlak oluşur. Malzemenin alaşımı elementi (özellikle C miktarı) çatlak oluşumu açısından son derece önemlidir. Yüksek alaşımlı yada yüksek karbonlu bir malzemenin ergitme kaynağında, malzemenin belirli bir kısmı ergiyerek ergimiş elektrot metali ile karışmakta ve kaynak metalini oluşturmaktadır. Tel ve toz seçiminin uygun olmaması durumunda, yüksek oranda C yada alaşım elementi içeren, mukavemeti yüksek ancak sünekliği düşük bir kaynak metali elde edilir.



Şekil 2.25. Kaynak metalinde oluşan sıcak çatlak hatası.

Bu durumda, katılaşma sırasında kaynak metali yeterli sünekliğe sahip olmadığı için kendini çekme sırasındaki şekil değişimi plastik alanda gerçekleşerek çatlak oluşumuna yol açabilir. Burada, sünekliği yüksek bir dolgu metali kullanımı ile çatlak oluşum tehlikesi azaltılabilir. Kaynak metalinin hızlı soğuması da bir diğer çatlak oluşum nedenidir. Eğer, esas metal soğuk ve kaynak banyosu küçükse

soğuma da o oranda hızlı olacaktır. Buna bağlı olarak, kaynak metalinin katılaşma sırasındaki büzülmesi (kendini çekme) çok hızlı gerçekleşecek ve bu da çatlak oluşumuna yol açacaktır. Bu durumda, malzemeye ön tav yapılması ya da ısı girdisinin artırılması ile soğuma hızı yavaşlatılarak çatlak oluşumu engellenebilir.

Çeliğin bileşimindeki FeS, Ni, Cu, Zn, Pb, Sn gibi düşük sıcaklıklarda ergiyen bileşiklerin varlığın da sıcak çatlak oluşumunu artıran etkenlerdir. Bunlar katılaşma sırasında merkeze doğru ötelenir ve son anda katılaştığı için katılaşma sırasındaki büzülme (kendini çekme) dolayısıyla boşluk oluşumuna ve bunun sonucunda da çatlak oluşumuna neden olurlar. Bunun ilk çözümü, nüfuziyeti azaltarak esas metalden kaynak metaline gelen bu tür kalıntıların miktarını azaltmaktır. Bir diğer yol ise, yeterli oranda Mn eklenmesi ile MnS oluşmaktadır. Ergime sıcaklığı yaklaşık 1595 °C olan MnS kaynak metali katılaşmaya başlamadan önce oluşur ve segregasyona yol açmaz. Dikiş geometrisi de kaynak yerinde oluşan çatlaklar üzerinde oldukça etkilidir. Şapkalı bir kaynak bağlantısında şapkalanmanın başladığı yerler çatlak açısından bağlantının en zayıf noktasıdır. Şapkalanmaya gerilimin aşırı fazla olması ya da kaynak hızının çok düşük olması neden olur. Bunu dışında, dikişin genişlik/derinlik oranı da çatlak oluşumu açısından son derece önemlidir.

Kaynak yerinde oluşan çatlaklara, mekanik zorlanmalar da neden olmaktadır. Tozaltı kaynaklı spiral dikişli boru üretiminde iç kaynağın bantların birleşme noktasına göre konumu son derece önemlidir. İç kaynak noktası, bant kenarlarının birleşme noktasından belirli bir uzaklıkta olmalıdır. Bant kenarlarının birleşiminden sonra kıvrımın etkisi ile oluşan şekil değişimlerini sona erdiği nokta, iç kaynak için çatlak oluşum tehlikesi açısından güvenli bir bölge olarak kabul edilebilir.

Soğuk çatlak oluşumu

Kaynak dikişi tamamen katılaştıktan sonra ortaya çıkan soğuk çatlak oluşumu için üç koşulun bir araya gelmesi gerekir; bunlar, yeterli derecede hidrojen varlığı,

yeterli derecede gerilim ve çatlağa duyarlı malzemedir (sertleşme özelliği). Söz konusu bu etkenlerden birinin ya da birkaçının giderilmesi ITAB bölgesindeki soğuk çatlak oluşumunu ortadan kaldırır. Genellikle dikişin ortasında boylamasına olarak ortaya çıkan soğuk çatlak 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda oluşur. Yüksek karbonlu ve alaşımlı çelikler ile yüksek mukavemetli az alaşımlı çeliklerde (HSLA) daha sık rastlanır.

Kaynak işlemi sırasında, ısıнын yerel olarak uygulanması ile malzemede ve özellikle kaynak dikişi civarında oluşan büyük sıcaklık farklılıklarından dolayı iç gerilmeler meydana gelir. Ergitme kaynağı işlemlerinde ortaya çıkan ve malzeme kalınlığına bağlı olarak artan iç gerilmeler çatlama eğilimini artırır, malzemenin plastik şekil değiştirme kabiliyetini azaltarak kaynaklı konstrüksiyonların kullanım güvenliğini olumsuz yönde etkiler. Kaynaktan sonra ortaya çıkan iç gerilmelerin, çalışma koşullarındaki zorlanmalar ve kaynak banyosundan yayılan hidrojenin olumsuz etkileri ile birleşmesi ve sertleşen bölgenin plastik şekil değiştirme özelliğinin olmaması nedeni ile kılcal çatlaklar oluşmaktadır. Genellikle gözle görülmeyen kılcal çatlaklar zamanla belirli bir büyüklüğe erişince gevrek kırılmaya yol açabilir. Çeliğin sertleşme eğilimi kimyasal özelliklerine göre değişir. Bu konu, özellikle az alaşımlı kalın etli yapı çelikleri için çok önemlidir. Kalın saclarda ısı çabuk yayıldığı için dikiş hızlı soğur ve dolayısıyla parça kalınlığına ve diğer soğuma koşullarına bağlı olarak çatlak tehlikesi ortaya çıkar. Geçiş bölgelerinde sert bir bölge oluşumunu engellemek için soğuma hızının olabildiğince azaltılması gerekir.

Gevrek kırılma

Kırılmaları bir kez aşırı zorlanma ile oluşan “zorunlu kırılma” ve zorlanmanın tekrarlanması ile oluşan “yorulma kırılması” olmak üzere iki ana gruba ayırma olanağı vardır. Zorunlu kırılmalar ise şekil değişiminin olmadığı ya da çok az olduğu “gevrek kırılma” ve şekil değişimi sonucunda oluşan “sünek kırılma” olmak üzere ikiye ayrılır. Sünek malzemeler uygulanan gerilmenin etkisiyle akma sınırının

üzerinde plastik şekil değişimine uğrar. Malzemeye uygulanan dış kuvvetlerin etkisi ile elastik şekil değişiminden hemen sonra plastik şekil değişimine uğramaksızın ya da % 1 gibi az bir uzamadan sonra parçanın iki veya daha fazla parçaya ayrılmasına “gevrek kırılma” denir. Gevrek kırılma, nereden ve ne zaman başlayacağı önceden kestirilemediği için son derece tehlikelidir. Geçmişte önemli kazalara ve büyük kayıplara yol açtığı için, üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış olup bu çalışmalar hala yapılmaktadır. Kaynaklı konstrüksiyonlarda gevrek kırılmanın önemi oldukça fazladır. Mühendislik yapılarında gevrek kırılmadan çekinilmesinin nedenleri şunlardır:

1. Genellikle $10-50 \text{ N/mm}^2$ gibi çok düşük dış gerilmeler bile hasara yol açabilir.
2. Çatlak parça içinde 5000 m/sn gibi çok büyük bir hızla ilerler ve bu sırada hasarı sınırlayıcı önlem almak olası değildir.
3. Malzeme kalınlığının artışı bile kırılmayı engelleyemez.

Kaynak sırasındaki ortam şartları gevrek kırılmanın başlamasına ve başladıktan sonra da devam etmesine elverişlidir. Kaynaklı konstrüksiyonlarda tüm parçalar arasında metalik bir bağ bulunduğundan, kırılma kaynak bağlantısı üzerinden bir taraftan diğer tarafa kolayca geçebilir. Birçok örnekte, kırılmanın ilk olarak konstrüksiyonun mukavemet olarak etkisi olmayan bir parçada başlayıp, kaynak dikişinden geçerek yayıldığı ve ana parçaları da kırmak suretiyle tüm konstrüksiyonun hasara uğramasına neden olduğu görülmüştür. Kaynak hataları gevrek kırılma bakımından tehlikeli bir durum yaratır. Bu nedenle, malzemeden kaynaklanan hatalarının giderilebilmesi için kaynağı yapılacak çeliklerde kalite ve bileşim bakımından bazı minimum şartların yerine getirilmesi gerekir. Şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olan malzemelerde gevrek kırılma tehlikesi azdır. Dolayısıyla, kaynak edilecek bir malzeme ancak yeterli sünekliğe sahip ise “kaynağa elverişli” olarak nitelendirilebilir. Gevrek kırılmanın oluşması aşağıdaki koşulların bir araya gelmesine bağlıdır:

1. Malzemenin gevrek kırılma eğilimi taşıması (heterojen iç yapı).

2. Malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olması.
3. Çentik veya benzeri kusurların bulunması.

Malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin gevrekleştirici bazı etkenlerden dolayı tükenmiş olmasıdır, zira düşük sıcaklık ve çok eksenli gerilme durumu gevrek kırılmayı kolaylaştıran faktörlerdir.

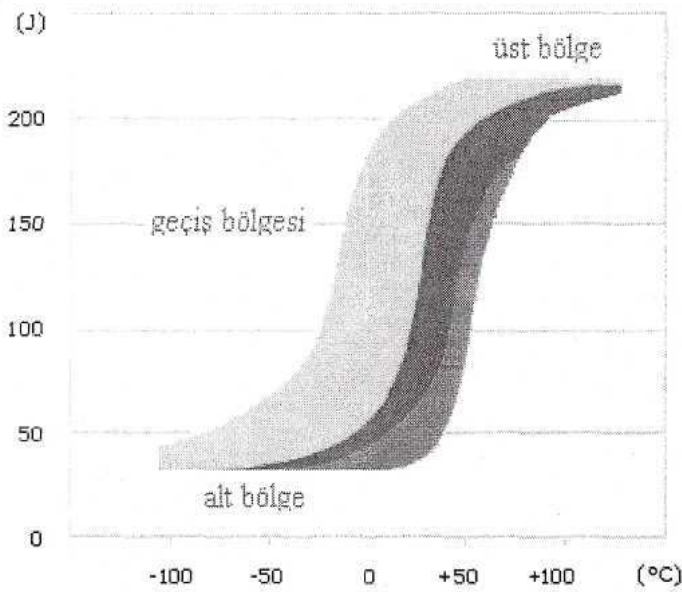
Kırılma davranışının incelenmesi için geliştirilen deney yöntemleri arasında özellikle çentik - darbe deneyi “vurma” yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntemin sakıncası elde edilen vurma değerinin (kıрма işi) sadece malzemeye özgü bir büyüklük olmayıp deney parçasının geometrisine çok fazla bağımlı olmasıdır [Şirin, 1997]. Bu nedenle, çentik - darbe deneyinde elde edilen sonuçlar mukavemet hesaplarında kullanılmaz. Deney DIN 51222’ye uygun olarak imal edilmiş sarkaçlı vurma cihazında yapılır. Cihazın çekici önceden belirlenmiş olan bir H yüksekliğinden düşer ve en alt noktada arka yüzüne vurduğu çentikli deney parçasını kırmaya zorlar. Deney parçasının kırılması ya da destekler arasından şekil değiştirerek geçmesi için sarkaç enerjisinin bir kısmı kıрма işi olarak harcanır ve bu değer cihaz göstergesinden doğrudan okunur. Çentik - darbe deney parçaları DIN 50115’de standartlaştırılmış olup, bunlardan en yaygın olanları DVM ve sivri çentikli ISO-V parçalarıdır. Numune parça genişliği arttıkça vurma tokluk değeri azalır, geçiş sıcaklığı artar.

Vurma değerinin büyük olduğu üst bölgede sünek, alt bölgede gevrek geçiş bölgesinde ise çoğunlukla karışık kırılma görülür. Sünek kırılmayı sağlayan en yüksek enerjiye denir. Tavan enerjisi yüksek ve geçiş sıcaklığı düşük olunca tokluk özelliği iyileşir; tavan enerjisi düşük ve geçiş sıcaklığı yüksek olunca da tokluk düşer ve çelik gevrekleşir. Sıcaklık kırılma davranışını etkileyen önemli bir etkidir. Bütün çelikler oda sıcaklığında iyi bir çentik - darbe mukavemetine sahip olmalarına karşın bazıları düşük sıcaklıklarda çok gevrek bir davranış gösterirler. Sünek halden gevrek hale geçiş belirli bir sıcaklık aralığında olur ve çelik bu

sıcaklık aralığında gevrek hale gelir. Geçiş sıcaklığı, sünek kırılma ile (üst bölge), gevrek kırılma (alt bölge) ayrımı sağlar (Şekil 2.26).

Bir çeliğin geçiş sıcaklığı malzemenin kimyasal bileşimi, uygulanan mekanik ve ısı işlemleri; tane büyüklüğü ve içyapı gibi bir çok faktörün etkisi altında olup değişik şekillerde tanımlanabilir:

1. Vurma değerinin belirli bir sınır değere (örneğin 27 J) ulaştığı sıcaklık.
2. Kırılma yüzeyi incelendiğinde gevrek olarak kırılan kısmın tüm alanın belirli bir yüzdesi (örneğin % 80) olduğu sıcaklık.
3. Üst sınırdaki vurma işinin belirli bir yüzdesine karşılık gelen sıcaklık.

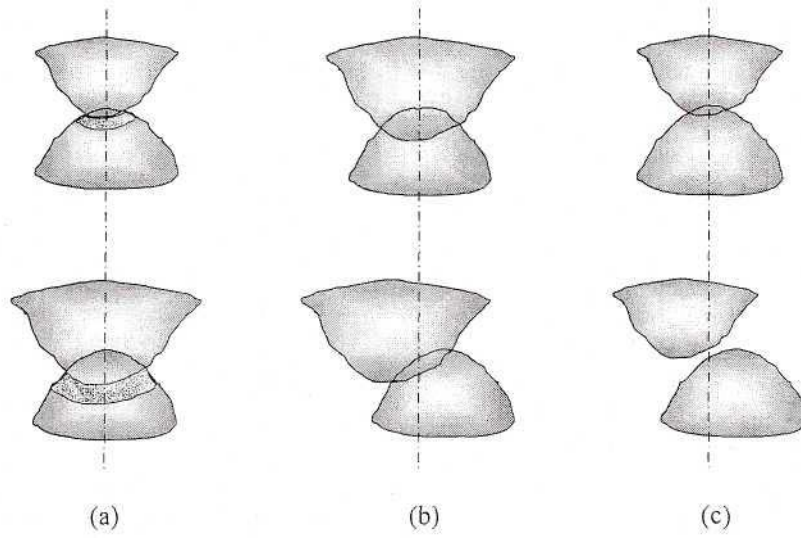


Şekil 2.26. Çentik vurma işinin sıcaklıkla değişimi

2.5.6. Geometrik kaynak hataları

Dikiş kaçıklığı, bindirme, işlerlik, genişlik/derinlik oranı, kep yüksekliği ve açısı gibi kaynak geometrisindeki düzensizlikler yük altında bağlantının tokluk davranışını olumsuz yönde etkilemektedir. İşlerlik iç ve dış dikişinin birbirine

geçme miktarı olarak tanımlanabilir. İşlerlik oranı iki açıdan önem taşımaktadır. Dış kaynak sonrası iç kaynağın belirli bir bölümü ısı yayılımı nedeni ile yapı değişikliğine uğrar. Bu bölge kaynak bölgesi olması nedeni ile zaten mikroyapısal değişime uğramış olup, dış kaynak sonrası etkisinde kaldığı ısı çevrim nedeni ile oldukça kaba taneli bir yapıya dönüşerek tokluk açısından kaynak dikişinin en zayıf bölgesini oluşturur.



Şekil 2.27. İşlerlik ile dikiş kaçıklığı arasındaki ilişki

İşlerlik miktarının artması bir anlamda dış kaynak için uygulanan ısı girdisinin de arttırılmasını zorunlu kılar. Bu ise, iç kaynakta dış kaynak sonrası ısıdan etkilenen bölgenin daha da büyümesine neden olur (Şekil 2.27-a). Bu nedenle, işlerlik miktarı bu bölgenin kaynak tokluğunda problem yaratmayacak düzeyde olacağı kadar yüksek olmalıdır. Öte yandan, işlerliğin belirli bir orandaki eksenel dikiş kaçıklığını tolere edebilecek düzeyde olması gerekir (Şekil 2.27-b). İşlerlik miktarı yeterinden az olursa, az bir orandaki dikiş kaçıklığı bile nüfuziyet problemine yol açabilir (Şekil 2.28-c). Bersch ve Koch tarafından spiral dikişli boru üretiminde St52 ile X70 kalite malzemelerin mekanik performanslarının mukayesesi amacı ile 1972 yılında yapılan bir çalışmada nüfuziyet derinliğinin malzeme kalınlığının % 60'ı kadar olmasının yeterli olacağı ifade edilmiştir. Her bir dikişin nüfuziyet derinliği işlerlik problemi yaratmayacak düzeyde olmalıdır.

Kaynak kepi ergiyen telin dikişte oluşturduğu çıkıntı kısmıdır. API 5L standardında, izin verilebilir kaynak kep yüksekliğini, 12,7 mm'den daha ince malzemelerde maksimum 3,17 mm ve 12,7 mm'den kalın malzemelerde ise maksimum 4,76 mm olarak verilmiştir. Ancak, şapka açısının da göz önüne alınması durumunda, kep yüksekliğinin maksimum 2 mm ile sınırlandırılmasında yarar vardır. Şapka açısı da 30 ile 50° arasında olmalıdır [Weisweiler and Sergeev, 1988].

Tozaltı kaynak yöntemi, kaynak banyosunun göreceli olarak yavaş soğuması ile karakterize edilebilir. Ancak, bazı durumlarda segregasyon, iri taneli yapı ve sıcak çatlak oluşumlarına rastlanabilmektedir. Bu durum, kaynak dikiş geometrisindeki uyumsuzluklardan kaynaklanan soğuma düzensizlikleri ile açıklanabilir. Söz konusu bu uygunsuzlukların başında ise kaynak dikişinin genişlik/derinlik oranı gelmektedir. Dikiş genişliği, gerek kaynak ağzı açılmış kısmı tam olarak kapatarak yanma oluşuna neden olmayacak gerekse gazların kaynak banyosundan dışarıya rahatça çıkmasına olanak sağlayacak genişlikte olmalıdır. Derinlik ise, yeterli oranda işlerliğin sağlanabilmesi için malzeme kalınlığının en az % 60'ı kadar olmalıdır.

The Welding Institute, genişlik/derinlik oranının 1,8 'den küçük olması halinde çatlak oluşum tehlikesinin artacağını belirtmektedir [Linnert, 1994]. Buna karşın, Lincoln Electric, söz konusu bu oranın 0,5'den küçük olması halinde ise çatlak tehlikesinin çok yüksek olacağını, 1,3'den büyük olması halinde ise çatlak tehlikesinin azalacağını bildirmektedir [Lincoln Electric, 2000]. Diğer bir yazar ise, iç dikiş için genişlik/derinlik oranının 0,5 ile 10 arasında, dış dikiş için ise bu oranının 1 ile 8 arasında değişebileceğini belirtmektedir [Şirin, 1997].

3. BORU HATTI ÇEŞİTLERİ VE BORU İMALATI

3.1.Boru Hattı Çeşitleri

Dünyada kullanılan petrol ve doğalgaz boru hatlarının çoğu toplama hattı, transmisyon hattı ve dağıtım hattı olmak üzere üç gruba ayrılır. Diğer boru hatları doğal gaz ve petrol üretimi esnasında kullanılmaktadır ve üreticiye aittir. Küçük çaplı bu hatlara akış hatları denir.

Petrol boru hatları

Petrol boru akış hattı: Kuyudan tüketiciye ürünü taşıyan taşıma zincirinin ilk elemanı olan akış hatları üretilen petrolün kuyulardan sahada işlemleri depolanmanın yapıldığı merkezi noktalara taşınmasında kullanılır. Bu hatta kullanılan borular 2 ila 4 inch çapları arasındadır.

Ham petrol ana boru hattı: Petrol büyük merkezi depolama tesislerinden rafinerilere ve diğer büyük depolama tesislerine büyük çaplı uzun mesafeli bu ana hatla iletilir.

Doğalgaz boru hatları

Gaz toplama boru hattı: Petrol akış boru hattı ile benzer işleve sahiptir. Yani, kuyudan çıkarılan gazı gaz işleme tesislerine veya daha büyük toplama sistemlerine taşır.

Gaz transmisyon boru hattı: Ham petrol ana boru hattı ile benzer işleve sahiptir. Kuyulardan çıkarılmış ve işlenmiş temiz, kuru doğal gaz bu hat vasıtasıyla dağıtım bölgelerine, fabrikalara ve bireysel kullanıcılara taşınır. Genelde gaz boru hatları petrol boru hatlarına nazaran daha yüksek basınçlarda çalıştırılır. Petrol boru hatlarında gazın hareket ettirilmesi pompalar vasıtasıyla gaz boru hatlarında ise kompresörlerle yapılır .

Petrol ürünlerini taşıyan boru hatları: Rafineride işlenmiş olan ham petrolü tüketiciye ulaştıran boru hattı.

LNG boru hatları ve CO₂ boru hatları:

LNG; sıvılaştırılmış doğalgazı ifade eden İngilizce “likid natural gas” kelimelerinin kısaltmasından oluşmuştur. Daha fazla miktarda gaz taşımak maksadı ile sıvılaştırılan doğalgaz tankerler vasıtası ile doğalgaz çevrim istasyonlarına taşınır. LNG tankerlerden çevrim istasyonlarına LNG boru hatları vasıtasıyla taşınır. CO₂ boru hatları ise gaz haldeki CO₂’in taşınmasında kullanılır.

3.2. Petrol ve Doğalgaz Hat Boruları

Boru hattı yapımında kullanılan çelik boruları kazık ve casing olarak kullanılan veya petrol ve gaz kuyularının açılmasında kullanılan çelik borulardan ayırt etmek için hat borusu olarak adlandırılırlar. Hat borusu diğer tüp formundaki borulardan şu açıdan farklıdır; korozyonun azaltılması için hat borularına genellikle dış ve iç yüzeyden kaplama uygulanır. Hat boruları çok farklı çaplarda ve boyutlarda üretilir. Hat boruları farklı bileşime ve mekanik özelliklere sahip çeliklerden bir çok üretim yöntemi kullanarak imal edilebilir.

Günümüzde üretilen hat borularının çoğu API (American Petroleum Institute) standardına göre üretilmektedir. Kalifiye edilmiş üreticiler sattıkları boru üzerinde API kısaltmasını kullanma hakkına sahiptirler. Bu işaretleme hem üreticinin API kısaltmasını kullanmak için lisansa sahip olduğunu göstermekte hem de bu kısaltmayı taşıyan ürünün ilgili API standardına uygun olduğunu garanti etmektedir.

Petrol endüstrisinde kullanılan hat boruları farklı API standartlarına göre üretilmekle birlikte, API standartları aşağıda verilen açıklamayı yapmaktadır. Bu standart ne kusursuz bir mühendislik için gerekli olan koşulların sağlanmasını ne de

herhangi bir kimseyi hiçbir surette diğer standartlara göre üretim yapmaktan ve satın alma işlemini gerçekleştirmekten alıkoymayı amaç edinmemiştir.

Hat borularının imalatında kullanılan ana standart API Spec 5L'dir. Bu standart dikişsiz ve boyuna dikişli çelik boruları kapsamaktadır. API Spec 5L; Grade A, B, X kalite gruplarını ihtiva etmektedir ve daha önceleri ayrı yayınlar olan Spec 5LS ve 5LX API Spec 5L'ye dahil edilmiştir. Spec 5LS ve 5LX' in 1982 yılının mart ayında yapılan son baskıları geri çekilmiştir.

Tüm API hat boruları psi olarak verilen minimum akma mukavemetleri ile gösterilirler. Akma mukavemeti çelik test numunesinde belirli bir miktar kalıcı deformasyon oluşturan çekme gerilmeleri olarak tanımlanır. Test numunelerinin hazırlanma şekli ve testin nasıl gerçekleştirileceği standart da detaylı olarak anlatılmaktadır. Grade A kalite sınıfı 30.000 psi'lik minimum akma mukavemetine, Grade B kalite sınıfı 35.000 psi'lik minimum akma mukavemetine sahiptir. Diğer kalite sınıflarında, X42 ve X60 kalite sınıfındaki 42 ve 60 rakamı sırasıyla borunun 42.000 ve 60.000 psi'lik minimum akma mukavemetine sahip olan çelikten üretildiğini göstermektedir. API standardına göre üretilen hat borusu çelikleri elektrik ark ocaklarında ve bazik oksijen konvertörlerinde üretilmektedir.

Son yıllarda çeliklerin mukavemetlerinde ciddi artışlar oldu. API X70 kullanımı oldukça yaygınlaşmaya başladı ve NOVA Corp. of Alberta, Canada yüksek basınçlı doğalgaz boru hatlarında API X80'i kullanan ilk firmaydı. Boru et kalınlığı inceldiğinden dolayı yüksek mukavemetli boruların kullanılması malzemeden tasarruf sağlamaktadır.

Hat boruları, imalatında uygulanan yöntemle göre dikişli ve dikişsiz olmak üzere iki şekilde üretilir. Dikişsiz borular tek tiptir. Dikişli borular kaynak dikişinin şekline göre boyuna dikişli, spiral dikişli boru olmak üzere iki tipe ayrılır. Boyuna dikişli borular, uygulanan kaynak dikişi metoduna göre, elektrik kaynak dikişli boru, toz altı ark kaynak dikişli boru (SAW), gaz metal ark kaynak dikişli boru

(MAG), gaz metal ark kaynağı ve toz altı ark kaynağının birlikte uygulanması ile üretilen dikişli boru, alın kaynak dikişli boru, çift kaynak dikişli boru olmak üzere altı gruba ayrılır. Spiral dikişli borular uygulanan kaynak dikişi metoduna göre, toz altı kaynak dikişli boru olmak üzere yalnızca tek bir türdür. Bunlara ilave olarak, borular imalatında soğuk genişletme işlemi uygulanıp uygulanmadığına göre, genişletilmemiş genişletilmiş olmak üzere iki gruba ayrılır.

Dikişsiz boru şekillendirilebilen çeliklerden kaynak dikişi yapılmadan imal edilen borudur. Dikişsiz boru çeliğin sıcak işlenmesi ile imal edilir. Gerekirse, istenilen şekil, boyut ve özellikleri elde etmek için sıcak işlenmiş boruya, daha sonra soğuk veya sıcak haddeleme uygulanabilir. Elektrik kaynak dikişli boru, elektrik direnç veya elektrik indüksiyon kaynağı ile dışarıdan herhangi bir metal ilave edilmeksizin imal edilen boyuna dikişli borudur. Sınıfı X42' den daha yüksek kaliteli çelikten imal edilen, elektrik direnç ve indüksiyon kaynaklı boruların kaynak dikişleri, kaynak işleminden sonra en az 538 °C (1000 °F) sıcaklıkta ısıl işleminden geçirilmelidir. Sınıfı X42 ve daha düşük kaliteli çelikten imal edilmiş boruların kaynak dikişi benzer şekilde ısıl işleminden geçirilmeli veya kaynak bölgesinde martenzit kalmayacak şekilde ısıl işlem uygulanmalıdır.

Çizelge 3.1. API-5L'e göre çelik sınıflarına göre boru imalat metotları

Boru imalat metodu	Çelik Sınıfı	
	A 25	A - X 80
Dikişsiz boru	X	X
Alın kaynaklı boru	X	
Elektrik kaynak dikişli boru	X	X
Boyuna tozaltı kaynak dikişli boru		X
Gaz metal ark kaynak dikişli boru		X
Gaz metal ark kaynağı ve tozaltı ark kaynağı kombinasyonu ile imal edilmiş boru		X
Tozaltı ark kaynağı yöntemi ile imal edilmiş çift kaynak dikişli boru		X
Gaz metal ark kaynağı yöntemi ile imal edilmiş çift kaynak dikişli boru		X
Gaz metal ark kaynağı ve tozaltı ark kaynağı kombinasyonu ile imal edilmiş çift kaynak dikişli boru		X
Tozaltı ark kaynağı yöntemi ile imal edilmiş spiral kaynak dikişli boru		X

Çizelge 3.2. API-5L'e göre dikişli ve dikişsiz boruların kimyasal analizi

Boru tipi	Çelik Sınıfı	% C mak	% Mn		% P		% S mak.
			min	mak	min	mak	
Dikişsiz boru							
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	A 25 - C1 I	0,21	0,30	0,60		0,03	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	A 25 - C1 II	0,21	0,30	0,60	0,45	0,08	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	A	0,22		0,90		0,03	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	B	0,27		1,15		0,03	0,03
Genişletilmemiş	X 42	0,29		1,25		0,03	0,03
Genişletilmemiş	X 46, X 52	0,31		1,35		0,03	0,03
Soğuk genişletilmiş	X 42, X 46, X 52	0,29		1,25		0,03	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X 56, X 60	0,26		1,35		0,03	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X65, X 70, X 80	İmalatçı ile müşteri arasındaki anlaşmaya göre					
Kaynaklı boru							
Yalnız elektrik veya alın kaynaklı	A 25 - C1 I	0,21	0,30	0,60		0,03	0,03
Yalnız elektrik veya alın kaynaklı	A 25 - C1 II	0,21	0,30	0,60	0,45	0,08	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	A	0,21		0,90		0,03	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	B	0,26		1,15		0,03	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X 42	0,28		1,25		0,03	0,03
Genişletilmemiş	X 46, X 52	0,30		1,35		0,03	0,03
Soğuk genişletilmiş	X 46, X 52	0,28		1,25		0,03	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X 56, X 60	0,26		1,35		0,03	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X65	0,26		1,40		0,03	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X 70	0,23		1,60		0,03	0,03
Genişletilmemiş veya soğuk genişletilmiş	X 80	0,18		1,80		0,03	0,018

Çizelge 3.3. API-5L'e göre boruların mekanik özellikleri

Çelik sınıfı	Minimum akma mukavemeti		Minimum çekme mukavemeti	
	Psi	MPa	Psi	MPa
A 25	25000	172	45000	310
A	30000	207	48000	331
B	35000	241	60000	413
X 42	42000	289	60000	413
X 46	46000	317	63000	434
X 52	52000	358	66000	455
X 56	56000	386	71000	489
X 60	60000	413	75000	517
X 65	65000	448	77000	530
X 70	70000	482	82000	565
X 80	80000	551	90000	620

Toz altı ark kaynak dikişli boru, otomatik toz altı ark kaynağı tezgahı ile imal edilen boyuna dikişli borudur. Kaynak dikişi, içte ve dışta en az birer sıradan (pasodan)

ibaret olmalıdır. Gaz metal ark kaynaklı dikişli boru, sürekli gaz metal ark kaynağı ile imal edilen boyuna dikişli borudur. Kaynak dikişi, içte ve dışta en az birer sıradan (pasodan) ibaret olmalıdır. Gaz metal ark kaynağı, bir ark kaynağı metodu olup; sürekli beslenen bir elektrot ile malzeme arasındaki eriyerek birleşme işlemi, elektrik arkının meydana getirdiği ısı yardımıyla gerçekleştirilir. Arkın örtülmesi gaz veya gaz karışımı ile sağlanır. Gaz metal ark kaynağı ve toz altı ark kaynağının beraber kullanılmasıyla üretilen boru, bu iki yöntemin ard arda kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Bu metot da önce gaz metal ark kaynağı, sonra toz altı ark kaynağı uygulanır. Çift kaynak dikişli boru, toz altı ark kaynak işlemi veya gaz metal ark yöntemi yahut da bu iki yöntemin birlikte uygulanmasıyla imal edilen borudur. Kaynak dikişleri birbirinden yaklaşık olarak 180° açıklıkta olmalıdır. Spiral kaynak dikişli boru tozaltı ark kaynağı yöntemiyle imal edilen helis (spiral) dikişli borudur. Alın kaynaklı boru dikiş kenarlarının kaynaktan önce kaynak sıcaklığına kadar ocakta ısıtılarak, kaynaklı bağlantıyı yapmak için mekanik basınç uygulanmasıyla imal edilen boyuna dikişli borudur. Çizelge 3.1’de çelik sınıflarına göre boru imalat metotları görülmektedir. Çizelge 3.2’de dikişli ve dikişsiz boruların kimyasal analizi Çizelge 3.3’de de bu boruların mekanik özellikleri görülmektedir[Yıldız, 2000].

3.5. Az Karbonlu Alaşımsız Çelikler ve İnce Taneli Yapı Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği

3.3.1. Az karbonlu alaşımsız çelikler

Çağımız endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan metalsel malzeme demir esaslı alaşımlardır ki bunların içinde çelikler çok önemli bir yere sahiptirler. Çelikleri bu denli önemli kılan özellikleri ise, çok çeşitli alaşım yapabilme olanağının yanı sıra ısıtılı işlemler yardımı ile de farklı özellikler kazanabilmeleridir. Alaşımlarda belirli özellikleri elde etmek (kuvvetlendirmek) ya da gidermek (zayıflatmak) amacıyla önceden saptanmış miktarlarda bulunması zorunlu olan bileşenlere “alaşım elementi” geri kalan ve istenmeyenlere ise “katışkı” adı verilir. Söz konusu

katışkılar kükürt, oksit ve silikat türünden metalik olmayan katışkılar olup çeliğin ya da heterojen bir şekilde dağılmaları aynı kimyasal bileşime sahip çeliklerin özelliklerinin çok farklı olmasına yol açabilir.

Bu çeliklerin karbon yüzdesi % 30'dan azdır. Kaynak edilecek kesitlerin 25 mm'den ince olması ve şiddetli bir bağlantı zorlanması altında olmaması şartıyla bu çelikler ön ve son tavlama ve özel bir tedbir almadan kaynak edilebilirler. Az karbonlu çeliklerin elektrot seçimi nadiren kritik bir olaydır ve seçim genelde arzu edilen çekme dayanımına göre yapılır. Bu çeliklerin kaynağında az karbonlu çelik çekirdek teline sahip herhangi bir elektrot kullanılabilir. Bu çeliklerin kaynağında minimum 430 MPa'lık çekme dayanımı ve minimum 330 MPa'lık akma dayanımına sahip kaynak metalini oluşturan 60XX elektrotları kullanılabilir. Daha yüksek mukavemette kaynak metali gerekirse 510 MPa'lık çekme dayanımına ve minimum 360 MPa'lık akma dayanımına sahip kaynak metali oluşturan 70XX elektrotları kullanılabilir. Çentik - darbe dayanımının da önemli olduğu hallerde arzu edilen seviyede çentik tokluğuna sahip kaynak metali veren elektrot seçilmelidir.

Kaynağa uygunluğu iyi olan bu çeliklerde 0 °C civarında veya daha düşük bir sıcaklık altında kaynak yapılırken elin ılık olarak hissedebileceği bir sıcaklık aralığında ön tavlama yapmak gerekebilir[Yıldız, 2000].

Kaynağa uygunluğu iyi olan çeliklerde, büyük et kalınlıklarında ($t > 20$ mm) örneğin St 355 ve aynı kalitede çeliklerde 20 ile 150 °C arasında ön ısıtma yapmak gerekebilir[Şirin, 2004].

Alaşım elementi ise çeliğe belirli özellikleri kazandırmak için özel olarak katılan yani "istenilen" elementlerdir. Çizelge 3.4'de verilen sınırlara ulaşan ya da bu değerleri aşan elementler çeliğin alaşım elementi olarak nitelendirirler. Çok sayıda alaşım elementinin birlikte bulunması durumunda, bunların etkilerinin toplanabilir olmaması nedeni ile beklenen özellik değişimleri ancak genel bir çerçevede ele alınabilir ve bu konuda kesin bir öngörü yapılamaz. Elementlerin çeliğin

içyapısında tek elementli faz, katı çözelti veya ara bileşik durumunda bulunması malzeme özelliklerini farklı şekilde etkiler. Demir esaslı alaşımlarda tek elementli fazlar sadece kurşun ve bakırdan kaynaklanır. Ancak, bu fazların yaratacağı olumlu etkiler sınırlı olduğundan her iki metalde alaşım elementleri arasında önemli bir yere sahip değildirler [Şirin, 2004].

Çizelge 3.4. Çeliklerin alaşımlı sayılabilmesi için içerebilecekleri element miktarlarına ilişkin alt sınırlar (EURO-NORM, 20–74).

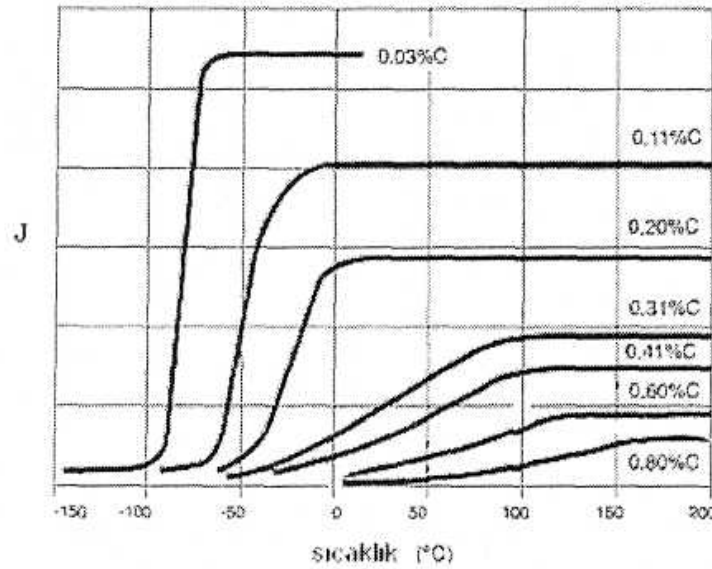
Element	Alt sınır (%)	Element	Alt sınır (%)
Alüminyum	0,10	Nikel	0,30
Bor	0,0008	Niobyum	0,05
Krom	0,30	Kurşun	0,40
Kobalt	0,10	Silisyum	0,50
Bakır	0,40	Titanyum	0,05
Mangan	0,60	Vanadyum	0,10
Molibden	0,08	Zirkonyum	0,05

Buna karşın, katı çözelti ya da bileşik oluşturan metaller yarattıkları özellik değişimleri nedeniyle çeliklerin alaşımlandırılmasında oldukça önemli bir rol oynamaktadırlar. Katı çözelti oluşturan alaşım elementleri genel olarak ferrit yapıcı ve östenit yapıcı olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Ferrit yapıcı alaşım elementleri; Cr, Al, Ti, Mo ve V'dur. Östenit yapıcı alaşım elementleri ise; Ni, C, Co, Mn, ve N'dur. Ara bileşikler ise en az iki alaşım elementinin atomları arasında çok büyük çekme kuvvetlerinin bulunması sonucu ortaya çıkarlar ve bileşenlerinden farklı ve karmaşık bir kristal yapıya sahip olup, genellikle çok sert ve gevrekler. Çeliklerde teknik açıdan en önemli ara bileşikler karbür ve nitrürler ile hem karbon hem de azot içeren karbonitrürlerdir.

Nitrür yapıcı elementler Al, B ve Si'dur. Diğer kuvvetli nitrür yapıcılar, çelik yapısında aynı zamanda karbür yapıcı olarak da davranırlar. Çelikte nitrür yapmayıp sadece karbür yapan element sayısı çok az olup, bunların başında Mo gelir. Mn, Cu ve Ni gibi elementler ise zayıf nitrür ve karbür yapıcı elementlerdir. Hem karbür hem de nitrür yapan elementler arasında ise Cr, V, Nb, Ti ve Zr

sayılabilir. Termodinamik verilere göre, genellikle nitrür oluşumu karbür oluşumundan önce gelir. Ancak, V, Nb ve Ti eklenmesi durumunda, bu elementlerin tüm nitrür ve karbürlerinin östenit fazında erimesi, çökeltilerinin karbonitrürler halinde olmasını da olanaklı yapmaktadır [Şirin, 2004]. Tüm bu alaşım elementlerinin gerek çeliğin gerekse kaynak bağlantısının özellikleri üzerine etkilerini kısaca incelemekte yarar vardır, buna göre;

Karbon: Çeliğin özellikleri üzerinde en önemli etkiye sahip elementtir. Çeliğin bileşiminde ki % 0,1 oranındaki C farklılığı bile, çeliğin metalurjik davranışı ve mekanik özellikleri üzerinde oldukça önemli değişimler yaratır. Karbon, çeliğin mukavemetini ve sertleşme eğilimini artırır. Bu nedenle, malzemenin akma dayanımını arttırmanın en ekonomik yolu karbon ilavesidir. Çeliğin bileşimindeki C miktarı arttıkça malzeme o denli sert ve gevrek olur, sıcak çatlak ve sertleşme çatlağı tehlikesi artar. Süneklik, tokluk ve kaynak edilebilme gibi önemli mühendislik özellikleri çelikteki karbon içeriğinin artması ile bozulmaktadır (Şekil 3.1). Çeliğin bileşimindeki C miktarının azalması, aynı zamanda, hidrojen kırılabilirliğine karşı direncini de artırır. Çelik bünyesinde çözünmeyen karbon, demir ile birleşip demir karbür (Fe_3C) bileşiği oluşturarak yapıya dağılır.



Şekil 3.1. Karbonun tokluk üzerindeki etkisi.

Mangan: Alaşımsız çelikler % 1,6'ya kadar mangan içerebilirler. Bunun üzerinde ise “alaşımlandırılmış” sayılırlar. Demire kıyasla, manganın oksijen, kükürt ve karbona karşı ilgisi daha fazladır. Bu nedenle, manganın oksit ve kükürt giderme özelliği vardır. Mn ergimiş demire katıldığında oksijen ile reaksiyona girerek mangan oksit (MnO) oluşturur. Ancak, bu reaksiyon Mn veya O_2 bitene kadar devam etmez, bir süre sonra belirli bir denge oluşur. Diğer bir değişle, oksijenin tamamı giderilemeyip belirli bir noktaya çekilmiş olur. Bu nedenle, mangan Al ya da Si derecesinde bir dezoksidasyon elementi olarak nitelendirilmez. Mn ayrıca kükürt ile birleşerek mangan sülfür (MnS) oluşturur. MnS 'in demir içindeki çözünürlüğü son derece az olup, kaynak koşulları izin verdiği sürece cürufa karışarak kaynak banyosundan uzaklaşır. Bunun dışında, serbest haldeki Mn, karbonla birleşerek sertlik artışına neden olan mangan karbür (Mn_3C) oluşturur (Anık ve Tülbentçi 1966). Tüm karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde ve kaynak ek metalllerinde ve tozlarında alaşım elementi olarak kullanılan manganın genel olarak üç olumlu etkisi vardır. Bunlar; oksijen ile birleşerek dezoksidan görevini görmesi, sıcak çatlağa yol açan demirsülfat oluşumunu engelleyecek şekilde kükürdü bağlaması ve son olarak çelikte mukavemet artışı sağlamasıdır. Tüm bu etkilerin sonucunda mangan kırılma tokluğunu iyileştirici yönde bir etkiye sahiptir. Ancak, çeliğin bileşimindeki mangan artışı sertlik artışına ve dolayısıyla çatlak oluşum tehlikesinin de artmasına neden olur. Mn miktarının az olması ise gözenek oluşumunu artırır.

Kükürt: Demir içindeki kükürdün çözünürlüğü yok denecek kadar az olduğundan, içyapıda karakteristik demir sülfür (FeS) fazı ortaya çıkar. Demir sülfürün şekil değiştirme kabiliyeti az olduğundan tane sınırı kırılmasına yol açar. Bu nedenle, çeliklerdeki kükürt miktarı fosforda olduğu gibi sınırlandırılır. Ancak, miktarı çok düşük dahi olsa içyapıdaki kükürdün tehlikesiz bir biçime dönüştürülmesi zorunludur. Çeliğin kükürttten arındırılması ve metalik olmayan kalıntıların düzenli bir biçimde dağıtılması kükürdün ITAB bölgesinde neden olduğu tabaka ayrılmasını engeller ve aynı zamanda çeliğin mukavemetini artırır. Kükürt kaynak

metalinde sıcak çatlak tehlikesini artırır. Çoğu karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde kalıntı element olarak kükürt maksimum % 0,04 ile sınırlandırılmıştır.

Silisyum: Oksit ve kükürt giderme özelliği olup, çeliklerde alaşım elementlerinin düzenli olarak yayılmasını sağlar. Ancak, Si miktarının arttırılması sünekliği azaltarak kaynak bağlantısını daha gevrek yapar. Oksijen ile birleştiğinde cüruf kalıntılarına yol açan SiO_2 'yi oluşturur. Alaşımsız çeliklerde % 0,5'e kadar silisyum bulunabilir.

Molibden: Çoğu çeliğe % 0,5 – 1,5 oranlarında katılan molibden karbür yapıcı element olup, malzemenin akma mukavemetini yükseltir.

Krom: Karbür yapıcı (Cr_3C) olup, mukavemet ve sertlik artışı yaratır. Aynı zamanda, malzemenin korozyon direncini de artırır.

Nikel: Sıvı ve katı demirde tamamen ergimiş durumda bulunur. Düşük alaşımlı çeliklerde krom ile birlikte mekanik özelliklerin geliştirilmesi için kullanılan mukavemet artırıcı bir alaşım elementtir. Çeliğin bileşimindeki Ni artışı ile birlikte, malzemenin sertliği artarken aynı zamanda kırılma tokluğunda da belirli bir oranda iyileşme olur.

Bakır: Sertlik kazandırmak amacı ile çok düşük oranlarda çeliğe katılan bir alaşım elementi olup, % 0,40'a kadar çeliğin içinde çözünmektedir. Kaynaklı birleştirme işlemleri için bu oranın üzerine çıkılmaması önerilir. Çeliğin bileşimindeki, % 0,05'in üzerindeki bakır miktarı çatlak oluşum tehlikesini artırır.

Fosfor: Kalayla birlikte tokluğu en çok azaltan iki elementten birisidir. Çelikte % 0,6 oranında fosfor bulunması durumunda geçiş sıcaklığı 300 °C'ye kadar yükselmektedir(Güleç ve Aran, 1995). Bu nedenle, özellikle kırılma tokluğunun önem taşıdığı uygulamalarda çeliklerde fosfor miktarı olabildiğince düşük tutulur. Kaynak metalindeki fosfor miktarı kaynak tozunun, kaynak telinin ve metalin

bileşimindeki toplam fosfor miktarına oldukça yakındır. Bu nedenle, kaynak metalindeki fosfor miktarına sınırlama getiriliyorsa bunu sağlamanın en güvenilir yolu; tel, toz ve metalin bileşimindeki toplam fosfor miktarının kaynak metalinde istenen miktardan az olmasını sağlamaktır.

Alüminyum: Önemli bir dezoksidan elementtir. Ancak, çeliğin gözenek oluşumuna karşı hassasiyeti % 0,15 Al'dan sonra hızla artmaktadır. Bu durumda, kükürdün % 0,0012 'nin altında tutulması gerekir. Bu nedenle, çeliğin bünyesindeki Al miktarının çok az olmasında fayda vardır.

Vanadyum: Mikro alaşımlama amacı ile çeliğe % 0,05 – 0,10 arasında katıldığında, malzemede mukavemet artışı yaratır. Vanadyumun oksijene karşı ilgisi az, azota karşı ise oldukça fazladır. Karbürden çok nitrür oluşturunucudur. Vanadyum etkisi çelik içindeki N miktarına bağlıdır. Azot oranının artmasıyla birlikte çözünmesi zorlaşır. Östenit içindeki çözünürlüğü çok yüksek olduğundan tane boyutuna etkisi yok denecek kadar azdır. Ancak, yüksek çözünürlük özelliği nedeni ile çökeltme sertleşmesi üzerinde etkisi en fazla olan alaşım elementidir.

Titanyum: C, N, O ve S'e karşı çok güçlü bir ilgiye sahiptir. Bu nedenle, karbür ve nitrür oluşturma özelliğinin yanı sıra yüksek bir sülfür ve oksit oluşturma eğilimi de söz konusudur. Bu nedenle, titanyum'un davranışını, sadece dezoksidan, sadece nitrür oluşturunucu ya da sadece karbür oluşturunucu olarak, tek bir yöne yöneltmek oldukça zordur. Sıvı çelikte, TiN oluşumu katılaşma öncesi ya da katılaşma sırasında oluşmaktadır ve sonrasında cürufa karışmakta ve bu nedenle de çeliğin özelliklerine bir katkı sağlamamaktadır. Ancak burada, tokluğu düşürücü yönde etkisi olan zararlı olan elementler grubundaki serbest oksijen ve azotun TiO ve TiN olarak bağlandığını ve dolaylı olarak tokluğu iyileştirdiğini de belirtmek de yarar vardır. Titanyum'un mukavemet artma etkisi N, S ve O ile birleşmemiş Ti miktarına bağlıdır. Bundan dolayı, Ti içerikli çeliklerin mukavemet özelliklerinin tekrarlanabilirliği ve kontrolü oldukça zordur.

Niobyum: Çeliğe eklendiğinde, yüksek C ve N ilgisi doğrultusunda karbür ve nitrür oluşturur. Ancak, karbür oluşturma eğilimi daha fazladır. Bu nedenle Nb; çeliklerde mukavemet arttırma amacıyla yaygın olarak kullanılan bir mikro alaşımlama elementidir. % 0,05 oranındaki Nb eklemesi bile önemli oranda mukavemet artışı sağlar. Ancak, Nb'un % 0,1'i geçmesi halinde soğuk çatlak ya da tokluk azalması tehlikesi artar.

Oksijen: Demir yüksek sıcaklıklarda çok az O₂ absorbe etmektedir (1400 °C 'de yaklaşık % 0,1 oranında). Sıvı fazda ise demirin absorbe ettiği oksijen miktarı hızla artmakta, fakat aşağıdaki denklemlerden de görülebileceği gibi yapıda bulunan Mn ve Si ile dezokside edilerek cürufa yansıtılmaktadır (Eş. 3.1 ve Eş. 3.2). Oksijen ile oluşacak reaksiyonların kontrol altına alınabilmesi için kullanılan yöntemlerden biriside kaynak ek metaline Mn, Si ve bazen de Al ve Ti gibi dezoksidan elementlerinin eklenmesidir. Oksijen çeliğe nüfuz ettiğinde;

1. Çelikteki alaşım elementleri ile kimyasal reaksiyona girerek hem alaşım elementlerinin yanma kaybına hem de kaynak dikiş kalitesini olumsuz yönde etkileyen oksit oluşumlarına neden olur.
2. Gaz durumunda ise kaynak banyosu içinde kalarak gözenek oluşturur.
3. Çelik yapısında belirgin bir gevrekleşmeye neden olur.



Azot: Oda sıcaklığında azot oldukça düşük miktarlarda absorbe edilirken, sıcaklığın artmasıyla birlikte absorbe edilme miktarı da artar. Kaynak tekniği bakımından, ark boyunun artması absorbe edilen N₂ miktarını da arttırır. Azot, çelik için çok zararlı katışkılardan birisi olup istenmeyen elementler grubundadır. Onbinde birler oranında bulunması bile akma sınırı ve çekme mukavemetini çok az bir miktarda yükseltirken, şekil değiştirme kabiliyetini ve de özellikle çentik vurma tokluğunu

şiddetli bir şekilde düşürür. Bu nedenle azot miktarının % 0,01 sınırını aşmaması zorunludur. Çelikte çözülmüş olan azot atomları özellikle dislokasyonların sık olduğu yerlere yayınarak dislokasyon hareketini engeller yani malzemenin şekil değiştirme kabiliyetini azaltır ve malzemeyi gevrekleştirir. Azotun bu olumsuz etkilerini gidermek için azota karşı eğilimleri demirden daha yüksek olan Al, Ti ve Nb gibi elementlerin sıvı çeliğe katılması azotu zor çözünen nitrürler olarak bağlar. Nitrür oluşturmamış serbest azot (N_f) malzemenin tokluk geçiş sıcaklığını (ΔT_G) olumsuz yönde etkiler (Eş. 3.3). Örneğin; % 0,005 oranındaki serbest azot geçiş sıcaklığının yaklaşık 50 °C daha yükselmesine yol açar. Ancak, azotun bazı alaşım elementleri ile birleşerek sert ve aşınmaya karşı nitrür oluşturma gibi faydalı etkisi de vardır [Tekin, 1984].

$$\Delta T_G = 700 \cdot (N_f)^{1/2} \quad (3.3)$$

Hidrojen: Hidrojen gazı, diğer gazlara karşın kaynak hatası oluşumunda çok daha fazla rol oynar. Hidrojen de azot gibi mukavemet değerlerini çok fazla yükseltmeden çeliği gevrekleştirir. Kaynak sırasında hidrojen absorpsiyonu katılmış kaynak metalinde gözenek ve ITAB'da çatlak oluşumu gibi kaynak hatalarına yol açabilir. Hidrojen, kaynak banyosuna birçok farklı yerden girebilir. Nem ve organik bileşikler (yağ, gres vb.) hidrojen başlıca kaynaklardır. Bu nedenle, tel ve toz gibi kaynak sarf malzemeleri ile kaynak edilecek yüzeyler yeteri derecede temiz ve kuru olmalıdır. H_2O molekülü doğada mevcut olan en sağlam moleküllerdendir. Su molekülünü oluşturan kovalent bağ ancak 2900 °C sıcaklıkta çözünür. Elektrik akımının 3600 °C'ye ulaşan sıcaklığı su molekülünü parçalayabilecek enerjiye sahiptir. Dolayısıyla, kaynak yapılan yüzeylerde ya da tozun içinde nem olarak bulunan su kısmen bileşenlerine ayrılarak (parçalanarak) hidrojen ve oksijene dönüşür. Açığa çıkan oksijen, Fe, Mn ve Si gibi elementlerle derhal reaksiyona girerek bağımsızlığını yitirir. Ancak, hidrojen ne demirle ne de onun alaşım elementleri ile herhangi bir reaksiyona girmez ve yabancı madde olarak varlığını sürdürür.

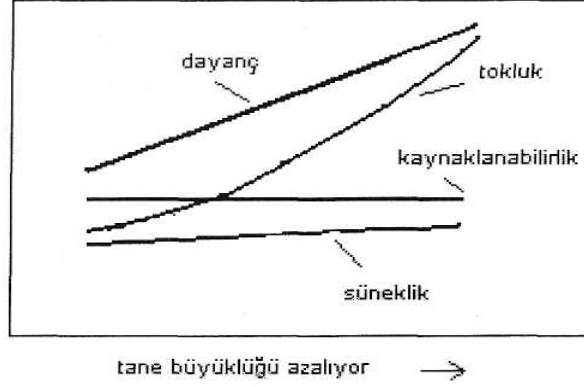
Hidrojen tüm atomların en küçüğü olması özelliği ile en kolay yayınan maddedir. Birçok farklı elementin olmasına karşın hidrojenin yayılım hızı, 230 °C’de 25 mm/h ve oda sıcaklığında 5×10^{-3} mm/h’dir. Atomik hidrojenin hızlı yayınma özelliği, hidrojenin kaynak metalinden esas metale de yayınmasına yol açar. Esas metale yayılan atomik hidrojen, özellikle kafes hataları ya da dislokasyonlar, tane sınırları ve kalıntılar gibi diğer süreksizliklerde toplanarak molekül haline geçer ve hareketliliğini yitirerek bu bölgelerde gaz basıncı oluşturur. Yayınan hidrojen atomları için mikro çatlaklar ideal birer çekim odağıdır. Böylelikle, bu bölgedeki zaten var olan bölgesel gerilim hidrojeninde yarattığı ek basınç ile daha da büyür ve çatlağı ilerlemeye zorlar.

3.3.2. Yüksek mukavemetli az alaşımlı (ince taneli) yapı çelikleri

Çelik yapısında mukavemet arttırıcı dört farklı mekanizma vardır. Bunlar; yapıdaki perlit miktarı (% C), Mn ve Si katı çözeltisi, ferrit tane boyutu ve karbür, nitrür veya karbonitrür şeklindeki bileşiklerin varlığıdır. Bu mekanizmaların her birinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri farklıdır. Özelliklerin en dengeli durumunu elde edebilmek için mukavemet arttırıcı bu mekanizmalardan bazıları seçilirken bazıları kullanılmayabilir. Sertleşme mekanizmaları içinde, mukavemet ile birlikte tokluğu da yükseltebilen tek sertleştirme mekanizması “tane küçültmesi” dir. Küçük ferrit taneleri, düşük karbon seviyelerinde bile kaynaklanabilirliği ve sünekliği etkilememeksizin mukavemet artışı sağlar (Şekil 3.2). İkincil faz partiküllerinden AlN, NbC ve Ti(C,N) birçok çelikte tane küçültücü olarak kullanılır. Bunların tane küçültücü etkisi, tane sınırlarını kilitleyici özelliklerinden ileri gelir. Bu temel nedenden dolayı, modern yapı çeliklerinde, karbon içeriği olabildiğince düşük tutularak, yüksek mukavemet özellikleri tane boyutunun düşürülmesi ile sağlanmıştır.

Modern yapı çelikleri olarak adlandırılan çelikler genellikle yalın karbonlu çeliklere oranla daha yüksek mukavemetli çelikler olup, göreceli yüksek mukavemetlerinden

dolayı “ Yüksek Mukavemetli Az Alaşımli “ ya da HSLA (High Strenghth Low Alloy Steels) çelikleri olarak adlandırılırlar.



Şekil 3.2. Tane küçülmesinin çelik özellikleri üzerindeki etkisi[Denizkuşu, 2001].

Yüksek mukavemetli, az alaşımlı (HSLA) veya mikro alaşımlı çelik olarak bilinen malzemeler, metalurjik olarak az alaşımlı çelikler grubuna girmektedir. HSLA çelikleri daha yüksek mukavemet, daha iyi tokluk değeri, daha iyi kaynak kabiliyeti ve bazı durumlarda özel ortamlarda sıradan karbon çeliklerinden daha iyi korozyon direnci elde etmek amacıyla az miktarda alaşım elementi içerecek şekilde üretilmektedir. İlk üretilen HSLA çeliği COR-TEN'dir. 1930'lu yıllarda üretilen COR-TEN atmosfer korozyonuna yalın karbon çeliklerinden yaklaşık olarak beş kat daha dayanıklıdır. Modern HSLA çelikleri spesifik özellikler elde etmek için modifiye edilmiştir. Örnek olarak, basınçlı kaplarda ve boru hatlarında kullanılan bazı HSLA çelikleri H_2S 'in olumsuz etkilerine yani hidrojenin neden olduğu basamak tipi çatlamalara karşı dayanıklıdır [Yıldız, 2000].

HSLA çeliklerinde alaşım elementlerinin toplamı genellikle % 2 değerini aşmaz. Çoğunda ise Mn katımlarının dışında bu değer % 0,1 ile 0,2 arasındadır. Bu çeliklerin bileşimindeki alaşım elementlerinin bu derece düşük olmasına karşın, çeliğe belirli özellikleri geliştirmek amacıyla katıldıkları için bunlara “mikroalaşım elementi” denir. HSLA çeliklerin olağan yapı çeliklerinden tek farkı onların tane büyüklüklerinin göreceli olarak çok daha düşük olmasıdır. HSLA çelik

uygulamasının temel amacı, ince kesitlerde yüksek mukavemet eldesi ile ağırlıktan kazanç sağlamak yani maliyetleri düşürmektir [Şirin, 2004].

Mukavemet artırma açısından çeliğe mikroalaşım elementlerinin eklenmesinin iki temel amacı vardır. Bunlardan ilki mikroalaşım elementlerinin oluşturduğu karbonitrürlerin östenit içinde çökmesiyle tane sınır hareketini engelleyerek “tane incelmesini” sağlamak, diğeri ise çökelti tanecikleri oluşturarak “çökeltme sertleşmesini” sağlamaktır. HSLA çeliklerinin özelliklerinden bahsederken, katışkı elementleri de (S, P, N, H ve O) dikkate alınmalıdır. Son yıllardaki teknolojik gelişmeler, bu elementlerin karbon ile birlikte oldukça düşük seviyelere indirilmesi ve oldukça temiz bir çelik eldesine olanak sağlamıştır. Çentik - darbe mukavemetinin yüksek olması istenen yapı çelikleri ve soğuk şekillendirilebilirlik gerektiren levha üretiminde, çelik temizliği ve kalıntıların biçiminin kontrol altında tutulması oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Ca eklenmesi kalıntıların boyut ve biçimini düzeltmede oldukça başarılıdır; bu nedenle, Ca enjeksiyonu işlemi tüm dünyada geniş olarak kullanılan bir yöntemdir.

Mikroalaşımli çeliklerin üretimi döküm, östenitleştirme, haddeme ve soğutma olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilir. Mikroalaşım elementlerinin ilavesi potaya döküm esnasında yapılır. Östenitleştirme, en önemli üretim aşamalarından birisidir. Mikroalaşım elementleri C ve N ile ilgileri yönünde reaksiyona girerek karbür, nitrür ve karbonitrürleri oluştururlar. Ancak, mikroalaşım elementleri çözünme sıcaklığı bakımından büyük farklılıklar gösterir. Vanadyumun oluşturduğu V(CN), 1150 °C östenit içinde çözünür. Niobiyumun oluşturduğu Nb(CN) ise 1250 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda çözünürler. Bu nedenle, östenitleştirme işlemi 1100 ve 1300 °C gibi geniş bir sıcaklık aralığında yapılır.

HSLA çelikleri çoğunlukla normalize edilmiş veya haddelenmiş durumda kullanılır. Haddeme işlemi nihai mekanik özelliklerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynar. Diğer taraftan su verme ve ıslah veya normalizasyon işlemi kalın bölgelerdeki tokluğu arttırılabilir veya bazı kalitelerin mukavemet sınırlarını genişletebilir.

Kontrollü haddeleme gibi özel haddeleme uygulamaları geliştirilmiştir. Bu tür uygulamalar termomekanik kontrollü işlem olarak bilinir ve Amerikan Petrol Enstitüsü levha şartnamesinde TMCP olarak gösterilir.

HSLA çeliklerinin mukavemeti ferrit tane incelmesi, çökelme sertleşmesi, dislokasyon sertleşmesi mekanizmalarının birlikte uygulanması ile arttırılır. Bu alternatif mukavemet arttırma mekanizmalarından dolayı, HSLA çeliklerinin mukavemetinin arttırılması perlit, martenzit veya beynitte olduğu gibi yüksek karbon içeriğine bağlı değildir. Diğer taraftan karbon içeriğinin düşük olması bir çok HSLA çeliğinin mükemmel kaynak kabiliyetine sahip olmasına imkân sağlamaktadır.

HSLA çeliklerinde mukavemet arttırıcı elementlerin başında tek başına ya da beraber maksimum % 0,1 civarında ilave edilen Niobyum ve Vanadyum gelmektedir. Bazı uygulamalarda, daha kalın malzemelerde veya daha fazla dayanımın istendiği durumlarda, nikel veya molibden alaşım elementi olarak kullanılabilir. Önceleri üretilen çelikler genellikle vanadyum ile birlikte ilave edilmiş azot içermekteydi, fakat azotun özellikle ısıdan etkilenmiş bölge ve tokluk üzerindeki kötü etkilerinden dolayı çoğu çeliklerde bu uygulamadan vazgeçilmiştir. Modern HSLA çelikleri kalıntı azotu bağlamak amacıyla yaklaşık % 0,025 civarında titanyum içermektedir, bu sayede ısıdan etkilenmiş bölgede tane incelmesi ve her tarafta iyi bir tokluk elde edilir. Önceleri üretilen HSLA çelikleri ingot döküm olarak üretiliyordu ve döküm işlemi ya tamamen sakın ya da yarı sakın olarak yapılıyordu. Fakat bugün üretilen çelikler sürekli döküm yöntemiyle tamamen sakın dökülmüş olarak üretilmektedir.

HSLA çeliklerinin akma mukavemetleri 42 ile 110 ksi (289 ile 760 MPa) sınırları içerisinde. Çekme mukavemetleri ise 60 ile 120 ksi (414 ile 830 MPa) arasındadır. Yüksek mukavemet ve yüksek tokluk değerlerine ilave olarak, çentik - darbe dayancısı, lameller yırtılma ve şekillendirilebilme gibi diğer özelliklerin iyileştirilmesi için kükürt, fosfor, oksijen gibi empürite elementleri çok az miktarda

içermektedir. Normalize edilmiş veya haddelenmiş durumda kullanılan çoğu HSLA çelikleri için malzeme şartnameleri ASTM tarafından hazırlanmaktadır. Diğer HSLA çelikleri için malzeme şartnameleri SAE J410c de ve MIL-S-24645A (HSLA-80/100) de mevcuttur. HSLA çelikleri orta karbonlu çeliklerin aksine (% 0,25-0,30 C) kaynak kabiliyetini kötü yönde etkilemeden iyi bir dayanım değeri, çentik - darbe dayancı ve korozyon dayanımı elde edilecek şekilde üretilmektedir. Niobyum, bakır, molibden, nikel, titanyum, vanadyum farklı bileşimlerde ilave edilir[Yıldız, 2000].

Çelikte bileşimindeki C ve N miktarı düştükçe ve östenitleştirme sıcaklığı artıkcça mikroalaşım elementlerinin çelik içindeki çözünürlükleri artar. Östenitleştirme sıcaklığı son derece önemlidir. Sıcaklık mikroalaşım elementlerinin çözünmesi olanak verecek kadar yüksek, ancak aynı zamanda tane irileşmesine neden olmayacak kadar da düşük olmalıdır [Ersoy, 2000]. Endüstride yaygın olarak kullanılan üç tür ince taneli yapı çeliği vardır. Bu çeliklerin eldelerinde uygulanan yöntemler ile mukavemet artırıcı mekanizmalar birbirinden farklıdır;

1. Islah edilmemiş ince taneli yapı çelikleri ($R_{eH} < 500 \text{ N/mm}^2$),
2. Islah edilmiş ince taneli yapı çelikleri ($R_{eH} > 500 \text{ N/mm}^2$),
3. Termomekanik yöntem ile haddelenmiş ince taneli yapı çelikleri ($500 < R_{eH} < 700 \text{ N/mm}^2$).

Islah edilmemiş ince taneli yapı çelikleri

Çok az miktarda katılan V, Nb, Ti ve Al gibi mikroalaşım elementlerinin yalnız başlarına ya da bileşenleri durumunda mikroyapı içinde oluşturdıkları ve ancak 1100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çözeltiye geçen çeşitli karbür, nitrür ve karbonitrürler östenit bölgesinde dahi tane büyümesini engelleyerek yüksek mukavemetli ve tok bir çelik grubunun elde edilmesine olanak sağlarlar. Bu alaşım elementlerinden V ve özellikle Nb eklenmesi (% 0,02 – 0,03) akma sınırını oldukça

yükseltir (80–100 N/mm²). Ni katkısı ise, çentik - darbe mukavemetinin yükselmesini sağlar.

Islah edilmiş ince taneli yapı çelikleri

Çeliğin kaynağa yatkın olma niteliğini önemli bir kayba uğratmadan mukavemet artırmanın yollarından birisi de az karbonlu martenzitik bir yapı oluşturmaktır. Islah etme daha çok yapı çeliklerine uygulanan, önce bir hızlı soğutma (su verme) daha sonra da yüksek sıcaklıkta temperleme işlemidir. Çelik ıslah etme işlemi sonucunda normalize durumuna göre daha yüksek bir akma sınırı ve az miktarda düşmüş bir uzama gösterir ki gayet tok bir yapıya sahip olur.

Termomekanik yöntem ile elde edilmiş ince taneli yapı çelikleri

Mikroalaşımlı çeliklerin üretiminde geleneksel haddeleme yöntemlerin dışına çıkılarak bu malzemeye has üretim yöntemleri geliştirilmiş olup buna genel olarak termomekanik işlem ısı ve mekanik yöntemlerin bileşiminden oluşup, en genel şekli ile kontrollü olarak uygulana deformasyon ve ısı işlem ile istenen son özelliklerin üretilen malzemeye kazandırılması şeklinde tanımlanabilir. Termomekanik haddeleme ile ferrit tane boyutunda önemli oranda azalma sağlanmaktadır. Bu yöntem ile yüksek akma sınırı ve üstün kırılma direnci özelliğine sahip, düşük C içeriği (< % 0,10) ile şekil alma kabiliyeti ve kaynak edilebilirlik özelliği oldukça yüksek bir çelik eldesi olasıdır.

3.3.3. Doğalgaz ve petrol boru hatlarında kullanılan çeliklerin özellikleri

Özellikle, korozyon nitelikteki doğal gaz ve ham petrol iletiminde kullanılan “off-shore” boru hatlarına yönelik kalite isimleri her geçen gün daha da artmaktadır. Bu tür boru hatlarının tasarım aşamalarında, söz konusu bu zorlu çalışma koşullarından dolayı borunun mukavemeti ve/veya kalınlığındaki artışlar kaçınılmaz duruma gelmektedir. Aynı zamanda, hattın güvenliği açısından gerek boru gövdesinde gerekse kaynak dikişinde özellikle düşük sıcaklıklarda oldukça yüksek tokluk

özellikleri istenmektedir. Öte yandan, servis sırasında boru hattının kısa süreli de olsa sour gaz ya da ham petrol nakli için kullanımı söz konusu ise, HIC (Hydrogen Induced Cracking) testleri gerek çelik üreticileri gerekse boru üreticileri için önemli bir kabul koşulu durumuna gelmektedir.

Gaz iletim boru hatlarında “sweet gas” ve “sour gas” olmak üzere iki tür çelik kullanımı söz konusudur. Sweet gazlar için, genellikle % 0,09 C ve % 1,6’ya kadar Mn içeren ve karbon eşdeğeri IIW’ye göre 0,32’ye kadar çıkabilen çelikler kullanılmaktadır. Bunlar çoğunlukla, Nb ve gerekiyorsa Ti ya da V eklenmesiyle alaşımlandırılmış olup, -20 °C ‘de tokluk değerleri 200 J civarında olan çeliklerdir. Tipik bir X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Sweet-gaz boru hattında kullanılan X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi

C	Si	Mn	P	S	Al	N	V	Nb	Ti
0,093	0,395	1,56	0,011	0,002	0,053	0,0074	0,075	0,051	0,004

NACE (The National Association of Corrosion Engineers) sınıflamasına göre (NACE MR 01 75/97) işlenen ürünün basıncı 0,4 MPa ve daha yüksek ise ve ürün içindeki hidrojen sülfürün (H_2S) kısmi basıncı 0,0003 MPa’dan daha yüksek ise bu tür ortamlar “sour” ortam olarak nitelendirilmektedir. CO_2 ve H_2S ’in her ikisi de nemin bulunmasıyla koroziye hale gelir ve doğal gazın koroziyefliliği bu değerlerin kontrolüyle belirlenir. Sour gaz için üretilen çelikler, kısaca tokluk özelliği yüksek ve HIC direnci oldukça fazla olan çelikler olarak karakterize edilebilir. Bu özellikler ise, pota kimyası ve yüksek düzeyde temizlik ile sağlanabilir. Böylelikle, sertleşebilme özelliği düşük ve HIC açısından oldukça zararlı olan kalıntı ve çökelti içermeyen çelik eldesi söz konusudur.

NACE çözeltisi (pH~3) ile yapılan HIC testlerinden olumlu sonuç alabilmek için sülfür içeriğinin % 0,0015’den daha az olması gerekir. Bu nedenle, çelik üretimi sırasında desülfürizasyon sonrası oluşan kalıntı sülfürü de giderebilmek için sülfüre

karşı ilgisi yüksek olan kalsiyum ile işleme tabi tutularak çeliğin içindeki sülfür istenilen düzeye getirilir. Alaşım eklemeleri, özellikle Cu ve Ni malzemenin HIC 'e karşı mukavemetini artırır [Graf and Niederhoff, 2000]. pH>5 olan BP çözeltisi ile yapılan testlerde, bu elementler koruyucu bir film oluşturarak hidrojenin çelik içerisine yayılımını engeller. Ancak, pH<5 ise, bu koruyucu film oluşmaz.

Özet olarak, HIC'e karşı dirençli boru hattı çeliklerinde ki karakteristik özellikler; düşük miktarda C, Mn ve S içeriği, Ca ya da benzer etkiyi verecek elementler ile sülfür kalıntılarının küreselleştirilmesi, düşük oranda oksit kalıntıları ile düşük oranlarda Cu ve Cr eklenmesi yapılmasıdır. Off-shore gaz hattında kullanılmak üzere üretilmiş bir X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.6 ve 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.6. Off-shore boru hattında kullanılan X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi

C	Si	Mn	P	S	Al	V	Nb	N	IIW
0,04	0,31	1,34	0,012	0,0008	0,038	0,07	0,044	0,004	0,286

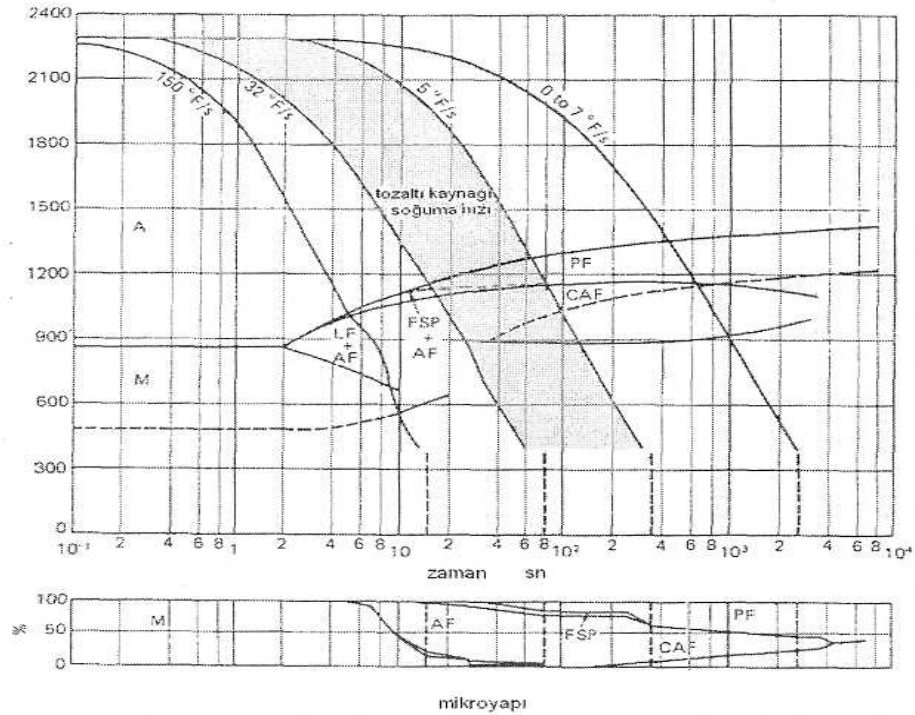
Çizelge 3.7. Off-shore boru hattında kullanılan X-65 çeliğin mekanik özellikleri

Akma muk. (MPa)	Çekme muk. MPa	% uzama	-20 °C (J)		
			Kaynak	ITAB	Ana metal
485	572	50,4	84	310	336

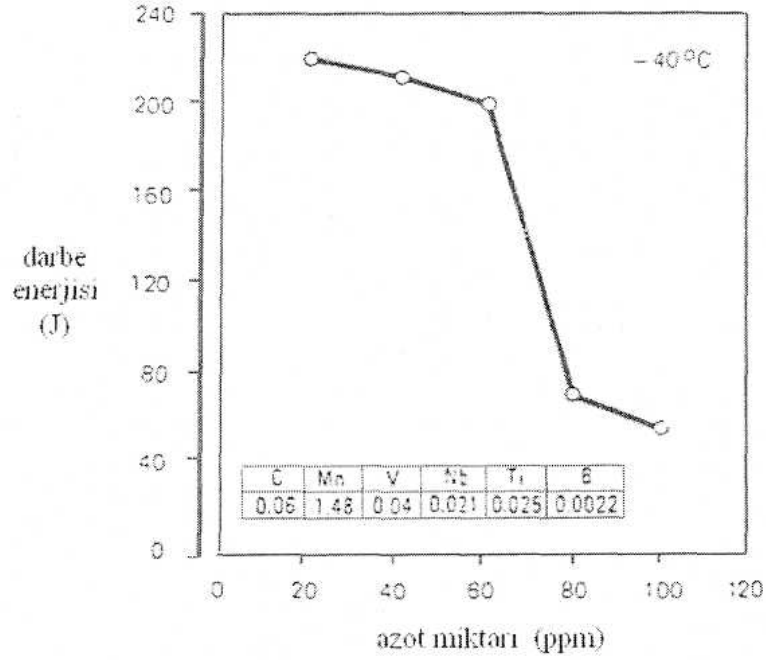
Çeliğin kimyasal bileşiminin kaynak dikişinin tokluk özellikleri üzerindeki etkisi

Tozaltı kaynağında, kaynak metali genel olarak büyük bir oranda ana metalden oluşmaktadır. Bu nedenle, ana metalin kimyasal bileşiminin kaynak bağlantısının kimyasal bileşimi, mikro yapısı, tokluk özellikleri ve çatlak hassasiyeti üzerindeki etkisi çok fazladır. ITAB bölgesinin tokluk özelliklerini artırma yönündeki olanakların kısıtlı olmasına karşın, kaynak metalinde uygun tel ve toz kullanımı ile istenilen kimyasal bileşimi sağlama ve dolayısıyla kaynak metalinin tokluk

özelliklerini iyileştirme olanağı oldukça fazladır. Şekil 3.3'de, bir HSLA çeliğinin, kimyasal bileşimi % 0,1 C, % 1,37 Mn, % 0,31 Si, % 0,002 P, % 0,020 S, % 0,06 Cr, % 0,02 Mo, % 0,08 Ni, % 0,15 Cu, % 0,03 Nb, % 0,034 O ve % 0,010 N olan kaynak metalinin soğuma eğrisi görülmektedir. 800 ile 500 °C arasındaki soğuma süresindeki herhangi bir değişim (yani ısı girdisindeki değişim) kaynak metalinin mikroyapısında büyük farklılıklar yaratmaktadır. Bilindiği gibi, gerek kaynak metalinin gerekse ısıdan etkilenmiş bölgenin tokluk özellikleri, ısı girdisinin artması ile bozulmaktadır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, kaynak metalinin mikroyapısındaki iğnemsî ferrit (acicular ferrite-AF) miktarı arttıkça kaynak metalinin tokluk özellikleri de iyileşmektedir. Mn, Mo ve Ni, iğnemsî ferrit oluşumunu artırarak kaynak metalinin tokluk özelliklerine olumlu katkı sağlamaktadır [Hulka, 2001]. Ancak, burada önem taşıyan bir konuda kaynak metalindeki serbest azot miktarıdır. Azot miktarındaki artışa bağlı olarak kaynak metalinin tokluk özellikleri düşmektedir. Bu nedenle, azotu bağlamak için Ti içerikli tel kullanımını oldukça yüksek tokluk değerlerinin elde edilmesine olanak sağlar (Şekil 3.4.).



Şekil 3.3. HSLA çeliği kaynak metalinin soğuma eğrisi [ASM Handbook, 1983].

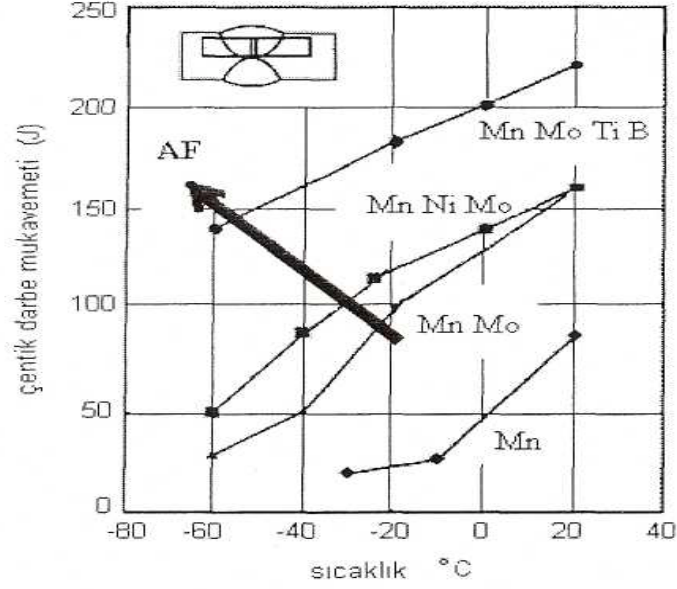


Şekil 3.4. Kaynak metalindeki azotun tokluk üzerindeki etkisi [Graf, 2000].

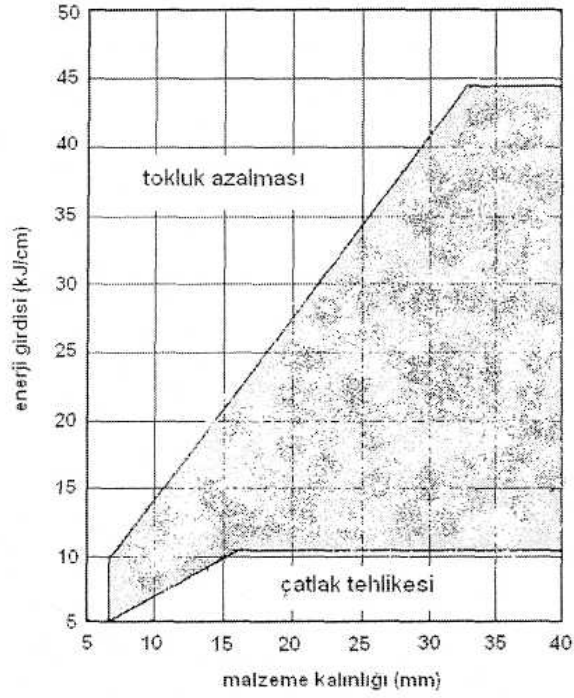
Sonuç olarak, kaynak metalinde uygun tokluk özelliklerinin elde edilmesi için, kaynak metalinde C, Mn ve Mo arasında uygun bir dengenin kurulması ve Ti-B içerikli kaynak teli ile alaşımlandırılması oldukça önemlidir (Şekil 3.5) [Jansen et al, 2002]. Ancak, Ti ve B ile alaşımlandırılmış kaynak telleri mutlaka düşük oksijen içerikli bazik esaslı tozlar ile eşlendirilmelidir.

ITAB bölgesinde istenen yüksek tokluk özelliklerine ulaşmada malzemenin kimyasal bileşiminin yanı sıra kaynak parametreleri de oldukça büyük bir öneme sahiptir. Bilindiği gibi, soğuma hızının yükselmesi durumunda (hızlı soğuma) oluşan martenzitik yapı ITAB bölgesinin tokluk özelliklerinin düşmesine yol açar. Tozaltı kaynağının en önemli karakteristik özelliklerinden birisi de yüksek ısı girdisi ve buna bağlı olarak yavaş soğuma hızıdır ($t_{8/5} \sim 50\text{sn}$) [Şirin, 2004]. Yavaş soğuma durumunda ise iri taneli bölgenin genişlemesi nedeni ile yine tokluk azalması oluşur. Tane irileşmesi ise HSLA çeliklerinde özellikle düşük sıcaklıklarda ITAB bölgesinin tokluk özelliklerini sınırlayan ana etkindir. İnce taneli yapı çeliklerinin kaynağında, ön tav sıcaklığı, enerji girdisi ve parça kalınlığı

kaynak bölgesinin soğuma hızını etkileyen en önemli üç faktördür. Kaynak bölgesinin özelliklerini kontrol altında tutabilmek için bu üç etkenin bir arada değerlendirilmesi gereklidir.



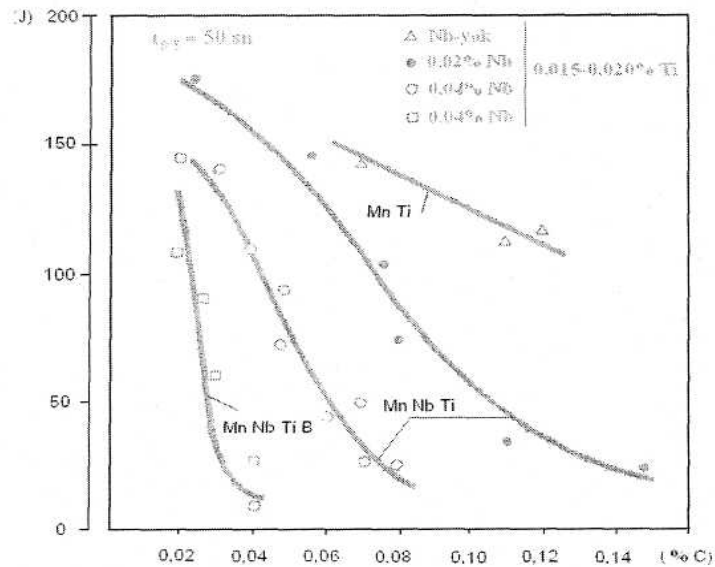
Şekil 3.5. Kaynak metalinde iğnemsli ferrit (AF) oluşumu [Hulka, 2001].



Şekil 3.6. StE 460 çeliğinin kaynağında kalınlık ile enerji girdisi arasındaki ilişki

Uygulamada, ısı girdisi için ortalama bir değer olarak kaynak edilecek malzeme kalınlığının her bir mm'si için 1 kJ/cm seçilir [Tülbentçi ve Kaluç, 2001]. Şekil 3.6'da StE 460 çeliğinin kaynağında kalınlık ile ısı girdisi arasındaki ilişki görülmektedir. Bu diyagramdan da görülmektedir ki; ısı girdisinin artması ile kaynak dikişinin tokluk özellikleri bozulmakta, ısı girdisinin azalması durumunda ise hızlı soğumadan dolayı martenzit oluşumu ve çatlak oluşum tehlikesi artmaktadır. Doğal gaz boru hatlarında oldukça yaygın olarak kullanılan StE 460 ince taneli yapı çeliği için DIN 17102–1983'de soğuma süresinin en az 6 sn en çok 25 sn olması gerektiğini bildirmektedir [Gülbahar ve Akay 1989].

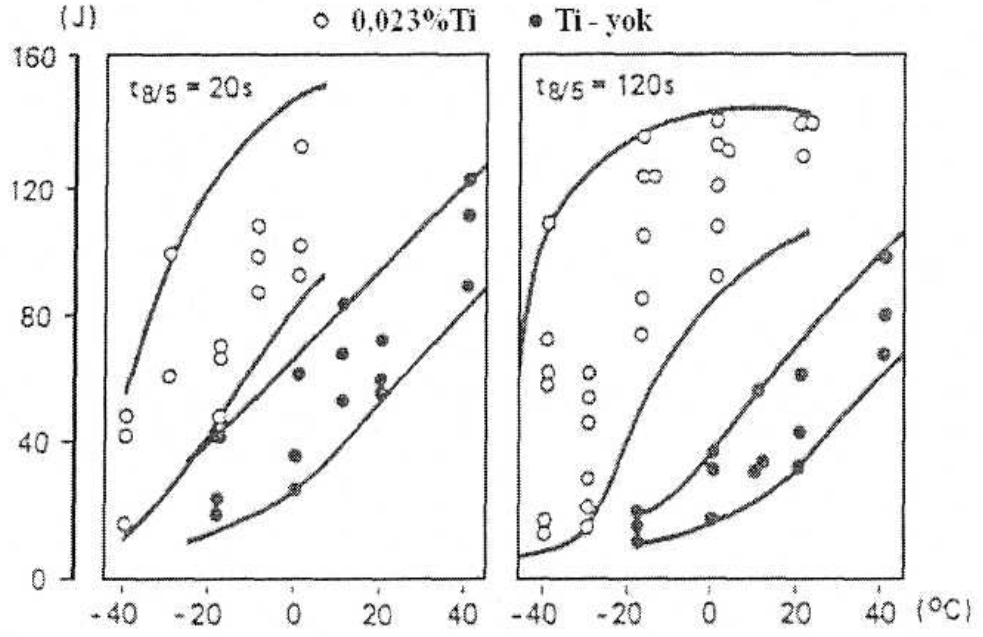
Şekil 3.7'de Ti ile alaşımlandırılmış çeliklerde C, Nb ve B'un ITAB bölgesindeki tokluk özelliklerine etkisi görülmektedir [Şirin, 2004]. Genel olarak, çeliğin bileşimindeki C miktarının azalmasıyla birlikte tokluk özelliklerinde belirgin bir artış sağlanmaktadır. Ni içermeyen ve maksimum % 0,025 Ti ile sınırlandırılmış olan Mn-Ti çeliği % 0,12 gibi oldukça yüksek bir C içeriğinde bile oldukça iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Ancak, bu çeliğe % 0,04 oranında Nb eklendiğinde arzu edilen yüksek tokluk değerleri C miktarının % 0,04'e düşmesi halinde elde edilmektedir. Mn-Nb-Ti-B çeliğinde ise C miktarı % 0,02'ye kadar düşmektedir.



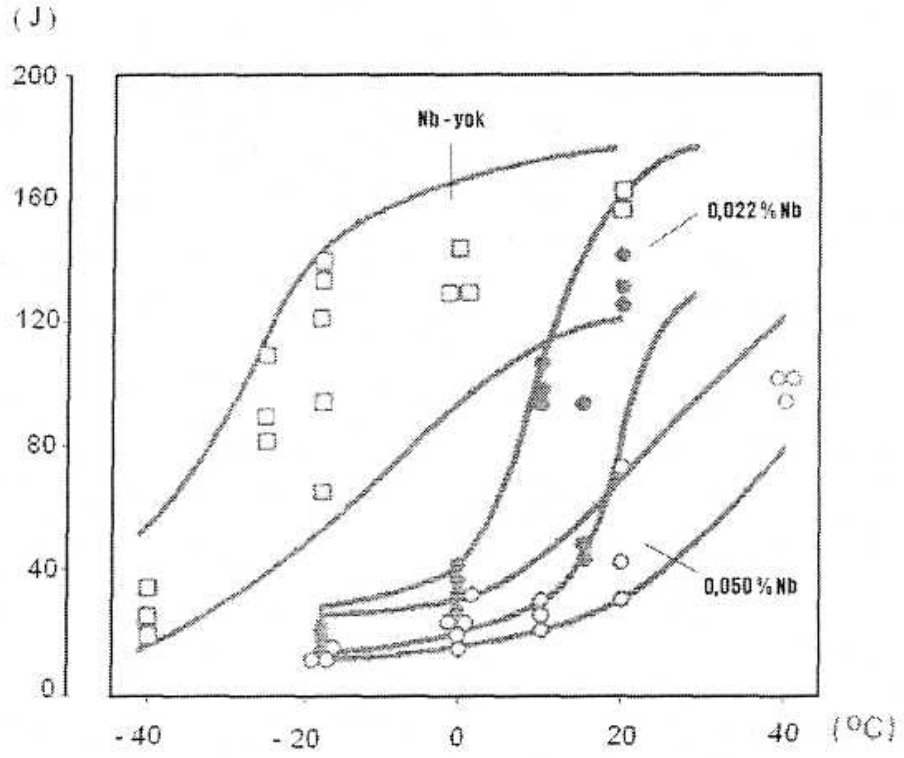
Şekil 3.7. C, Nb ve B'un ITAB bölgesi tokluk özelliklerine etkisi.

Bu nedenle, düşük tokluk özelliğinden dolayı B içerikli çeliklerin, gaz iletim boru malzemesi olarak kullanımı önerilmemektedir. Yüksek ısı girdisinin söz konusu olduğu kaynak yöntemlerinde, ergime sınırına bitişik ITAB bölgesinin mikroyapı ve tokluk özellikleri üzerinde titanyumun, belirli alaşımlama koşulları altında olumlu etkisinin olduğu bilinen bir gerçektir. Boru hatlarında kullanılan çelik borular için malzemeye belirli bir oranda Ti eklenmesi, ITAB bölgesinin tokluk özelliklerini iyileştirir. Çok ince zerrecikler halinde dağılmış bulunan titanyum-nitrür ve titanyum-oksit tanecikleri tane büyümesini engelleyici yönde davranırlar. Titanyum'un soğuma sırasında ITAB bölgesindeki tane inceltici etkisini Şekil 3.8'den de görme olanağı vardır [Şirin, 2004].

% 0,023 oranında Ti içeren çeliğin ITAB bölgesindeki tokluk özellikleri, Ti içermeyen çeliğe karşın çok daha iyidir. Bu da, titanyumun tane inceltme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Titanyumun tane inceltme özelliği ise, çeliğin bünyesindeki azot miktarında (60–80 ppm) bağlıdır. Ancak, Nb içermeyen ve termomekanik haddeme yolu ile üretilmiş çeliklerde, Nb eksikliğini gidermek ve arzu edilen mukavemet özelliklerini kazandırmak amacıyla yüksek oranda ($> \% 0,025$) Ti ile mikroalaşımlama yapılmış çeliklerin boru üretiminde kullanılmaları önerilmez. Çünkü bu tür çelikler yapı itibarıyla, Nb-esaslı çelikler gibi ince taneli çelik özelliklerini taşımaz ve tokluk özellikleri düşük olur. Ti miktarının artması ile birlikte ITAB bölgesinin tokluk özellikleri düşmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken konu, söz konusu çeliğin Nb içermemesidir. Gaz boru hatları için zorunlu olan mukavemet özelliklerinin sağlanması için çeliğe Nb eklenmesi söz konusu olunca, tokluk özelliklerinde belirgin bir düşme olur (Şekil 3.9). % 0,0015 oranındaki çok küçük Nb ilavesinde dahi, Nb ergime sınırına yakın yüksek sıcaklıklara maruz kalmış bölgelerde çözünerek TiN'ün tane inceltici etkisi ortadan kaldırır.



Şekil 3.8. Titanyumun ITAB bölgesinin tokluk özelliklerine etkisi.



Şekil 3.9. ITAB bölgesinin tokluk özellikleri üzerine Nb'un etkisi [Peters, 1998].

4. TOZALTI KAYNAĞI İLE PETROL VE DOĞALGAZ İLETİM HAT BORUSU ÜRETİMİ

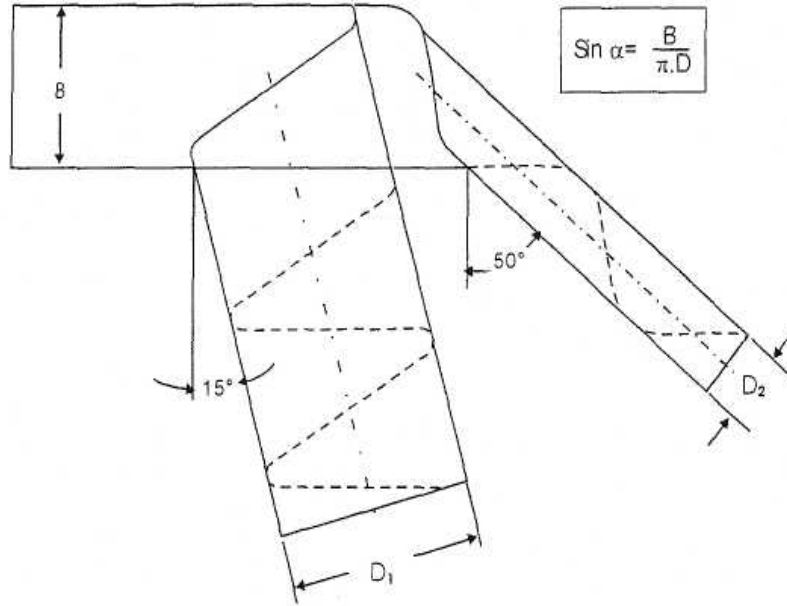
Gaz ve petrol iletim hatlarında çoğunlukla tozaltı kaynak yöntemi ile üretilen spiral dikişli veya boyuna dikişli çelik borular kullanılmaktadır. Her iki borunun üretim akışları birbirine göre bazı farklılıklar göstermektedir.

4.1. Spiral Dikişli Boru Üretim Yöntemi

Spiral kaynaklı boru üreten makineler de ana prensip, tahrik silindirleri tarafından itilen sac malzemeye, şekillendirme makaraları yardımı ile spiral bir hareket yaptırılmasıdır. Malzemenin sac olarak makine üzerinde ilerlediği bölümün, malzemenin kaynak sonrası boru olarak ilerlediği bölüm ile yaptığı açılı boru çapını belirleyen en önemli etkidir. Bu açılı makineye yerleştirilen bant genişliği ve elde edilmek istenen boru çapı göz önüne alınarak belirlenir (Şekil 4.1). İlgili açılı formülünden de görüldüğü gibi, bant genişliğinin sabit tutulması durumunda, makine ayar açısının değiştirilmesi ile elde edilen boru çapı da değişmektedir. Yine benzer şekilde, makine ayar açısı ile oynayarak, aynı çaplı boruyu farklı bant genişliklerinden elde etmek mümkündür [Peters et al, 1982].

Sac rulonun makineye yüklenmesinden sonra, üretim sürekliliğinin sağlanması için biten rulo ile yeni rulo uçları birbirine kaynak edilir (uç kaynak). Uç kaynak işlemi tozaltı kaynak yöntemi ile tek ya da tandem kaynak yöntemi ile yapılır. Bantların özellikle son kısmındaki 1/3'lük kısmı diğer bölgelere kıyasla daha küçük bir sarım radyüsüne sahiptir. Hatasız bir kaynak elde etmek için, bantın kaynak noktasına gelmeden önce sarımdan kaynaklanan eğriliklerin giderilmesi gereklidir. Bu nedenle, bant çoğunlukla uç kaynağın hemen sonrasında tahriksiz bir role düzeneğinden geçirilerek doğrultma işlemine tabii tutulur.

Boru çapını sabit tutabilmek ve iyi bir kaynak dikiş kalitesini elde edebilmek için önem taşıyan konulardan bir tanesi de bant genişliğinin sabit tutulmasıdır.



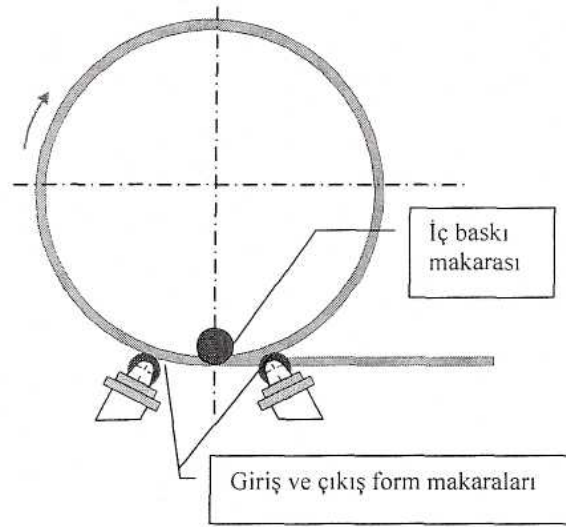
Şekil 4.1. Spiral dikişli kaynak makinesi açi ayarı

Bant genişliğinin öngörülenden daha dar olması halinde kaynak noktasında açma, aksi durumunda ise bindirme oluşur. Ayrıca, bant kenar yüzeyinin kalitesi iyi bir kaynak dikişi elde etmek için çoğu zaman yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, kenar kesme sonrası freze ile malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak ağzı açma işlemine geçilir. Bazı durumlarda, kaynak ağzı açılmadan önce bant kenarlarının belirli bir bölümü kesilerek çıkartılır [Şirin, 2004]. Söz konusu bu kesme işlemi mekanik ya da ısı kesme yöntemi ile olabilir. Bant et kalınlığının değiştiği bölgelerde, kılavuz roleleler yardımı ile kesme ekseninin hassas bir şekilde ayarlanması gerekir. Aksi takdirde; kaynak ağzında oluşabilecek bozukluklar, o bölgelerdeki kaynak kalitesinin de bozulmasına yol açar. Açılacak olan kaynak ağzı, malzeme kalınlığına bağlı olarak I, Y veya X biçiminde olabilir.

Bandın ilerletilmesi tek ya da çift roleli tahrik grubu ile sağlanır. Role ile bandın temas yüzeyinde oluşan kuvvetin daha homojen yayılması nedeni ile çift roleli tahrik grubu daha avantajlıdır. Ancak, burada dikkat edilmesi gereken konu, role

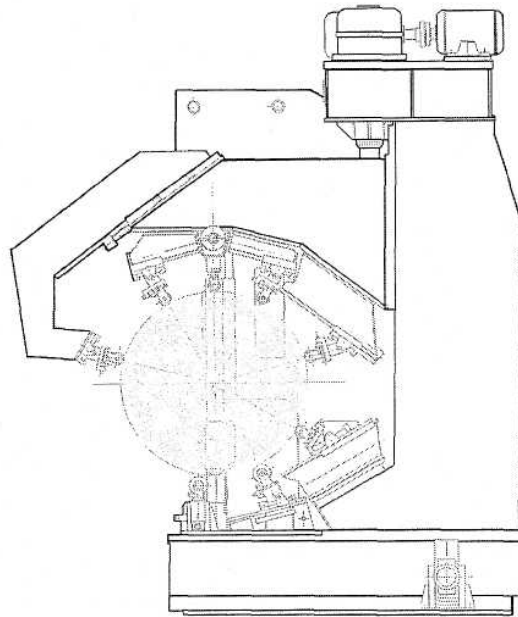
grupları arasındaki paralelliğin ve çalışma sırasındaki senkronizasyonlarının çok hassas bir şekilde olması gerekliliğidir. Tahrik grubu ile biçim (form) verme grubu arasındaki uzaklığın çok fazla olması durumunda özellikle ince etli bantlarda düşey yönde sehim oluşabilir ve bant ilerlemesi kontrol altına alınamaz. Bu nedenle, tahrik rolleri olabildiğince biçim verme grubuna yakın olarak yerleştirilir. Bant sürekli olarak tahrik rollerini merkezleyecek şekilde makineye yerleştirilir ve tüm makine ekipman ayarları bunu sağlayacak şekilde yapılır. Biçim verme öncesi yapılan son işlem bant kenarlarının kıvrılmasıdır. Çatılanma ve bindirme tipi hataların önlenmesi açısından, kenar kıvrırma son derece önemli bir işlemdir. Burada iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntem; bandın her iki tarafında bulunan ve iki farklı radyüse sahip role kullanımudur. Daha etkin olan ikinci yöntem ise, iki ayrı rolenin bandın alt tarafında bir diğer rolenin ise bandın üst tarafında olduğu üçlü role grubu kullanımudur. Üçlü role kullanımının üstünlükleri, malzeme, boru çapı ve makine açısı bağlı olarak bant kenarlarını istenilen bir radyüste kıvrırma olanağı sağlamasıdır. Tüm bu işlemlerden sonra, biçim verme rollerinin yardımı ile banda spiral bir şekil verilir (Şekil 4.2). Bandın spiral olarak şekillendirme işlemi üçlü- kıvrırma role gruplarının yardımı ile yapılmaktadır. Tüm bu şekillendirme makaraları kendi içinde bir dizi bağımsız makaradan oluşmaktadır. Bu bağımsız makaralarının her biri çalışma sırasında makine açısı ile eş açıda olacak şekilde ayarlanmalıdır.

Elde edilen borunun çap, ovallik ve doğrusallık gibi boyutsal hassasiyetini sağlayabilmek için üçlü role grubu ile yapılan şekillendirme sonrası kaynak işlemi tamamlanıncaya kadar, boruya verilmiş olan şeklin mutlaka korunması gereklidir. Bu ise ancak ek bir destek şekillendirme ya da koruma grubu tarafından sağlanmaktadır. Boruya dıştan temas eden dış kafes makara grubu (endüstriyel uygulamada deve boynu olarak da adlandırılmaktadır) ya da borunun içine yerleştirilen malafa grubu ile sağlanmaktadır (Şekil 4.3). Spiral dikişli boru kaynağının ilk aşaması boruya spiral biçim verilen bölgede yapılan iç kaynaktır. Dış kaynak ise iç kaynaktan ayrı olarak daha ileri bir aşamada yapılır.

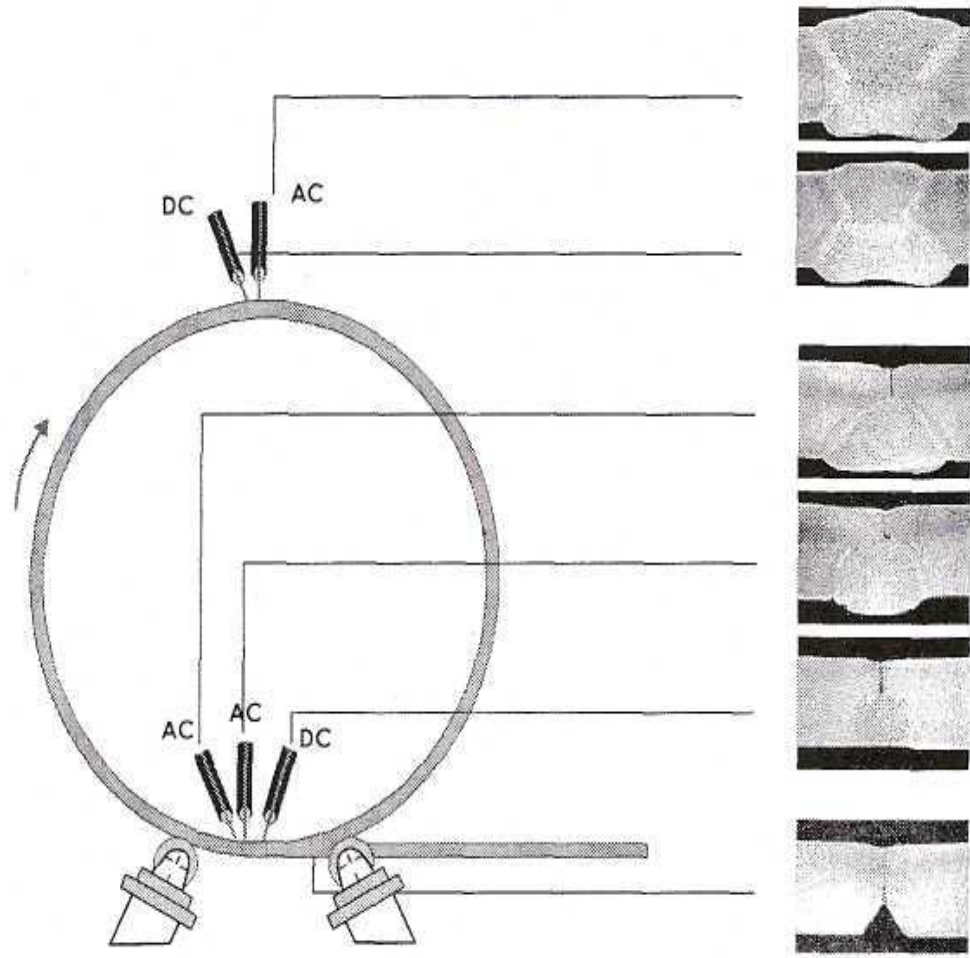


Şekil 4.2. Spiral dikişli boru makinesinde banda silindirik biçim verme

Kaynak işlemi tek ya da çoklu kafa kullanılarak yapılabilir (Şekil 4.4). Son aşama ise, borunun uygun boylarda kesilmesidir. Resim 4.1’de tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde kullanılan bir kaynak makinesinin değişik aşamaları Şekil 4.5’de ise şematik görünümü verilmiştir.



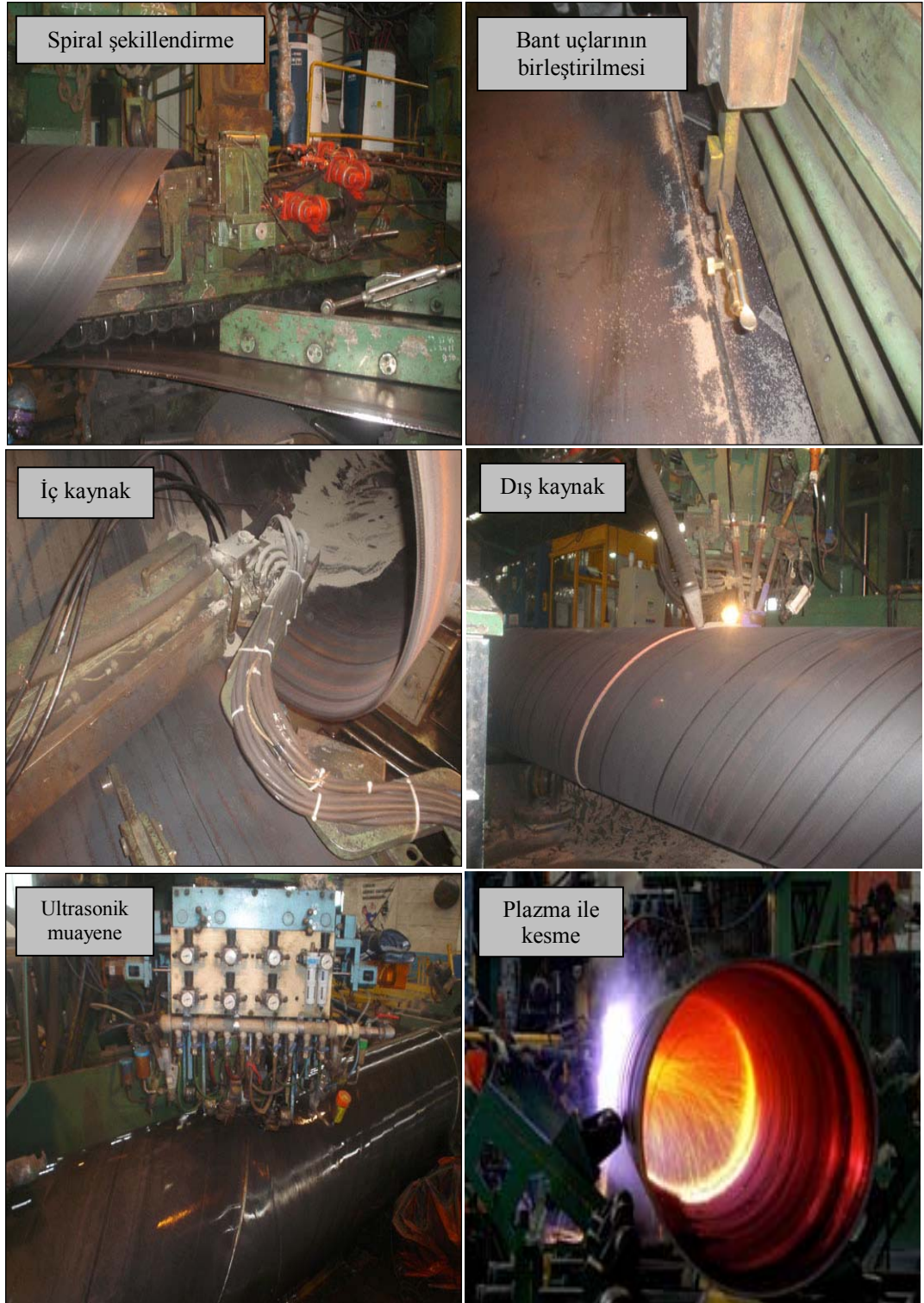
Şekil 4.3. Biçim (form) verme ünitesi (deve boynu)



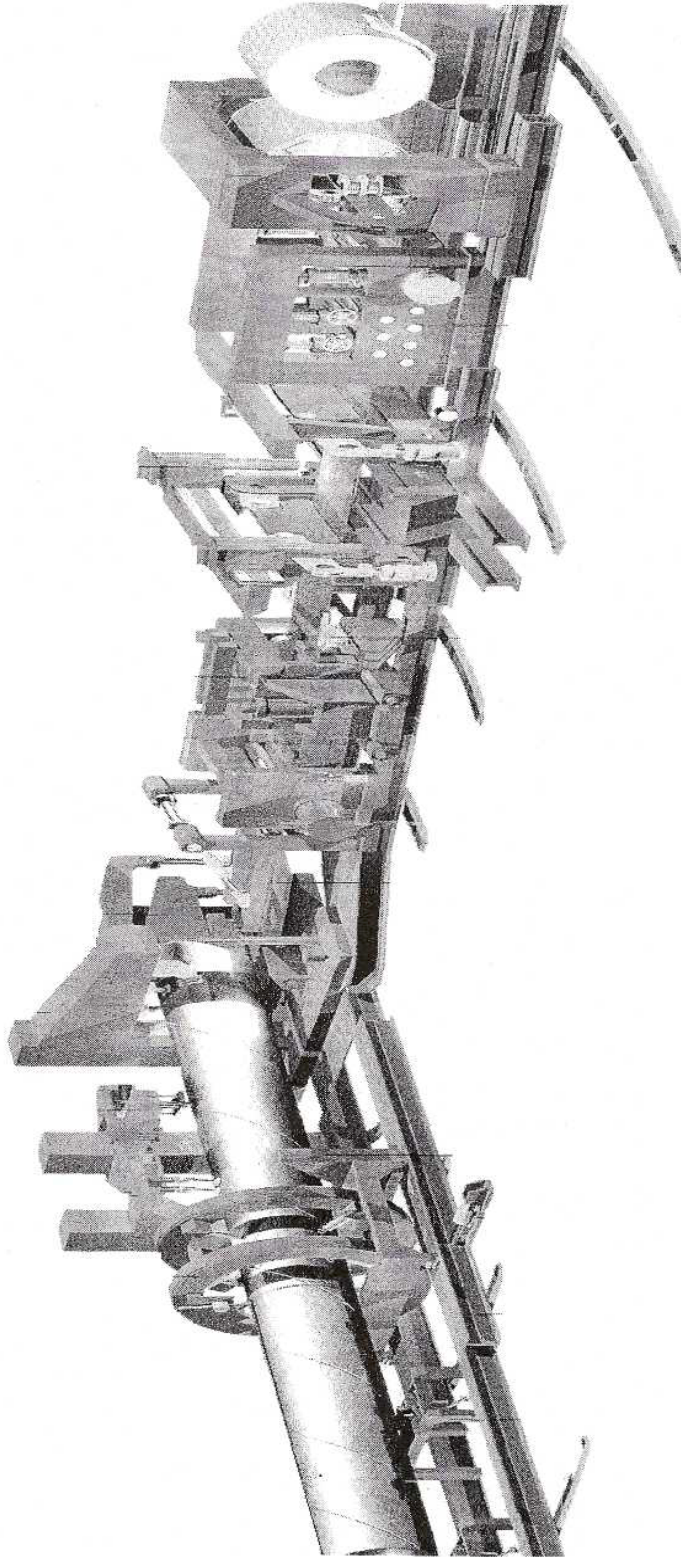
Şekil 4.4. Spiral dikişli boru üretiminde kaynak dikişinin oluşumu



Resim 4.1. Spiral dikişli boru üretim makinesinin değişik aşamaları



Resim 4.1. (Devam) Spiral dikişli boru üretim makinesinin değişik aşamaları



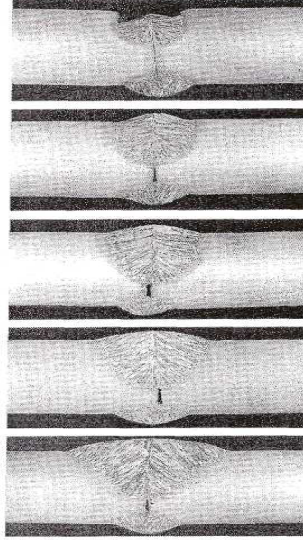
Şekil 4.5. Spiral dikişli boru üretim makinesinin şematik gösterimi

4.2. Boyuna Dikişli Boru Üretim Yöntemi

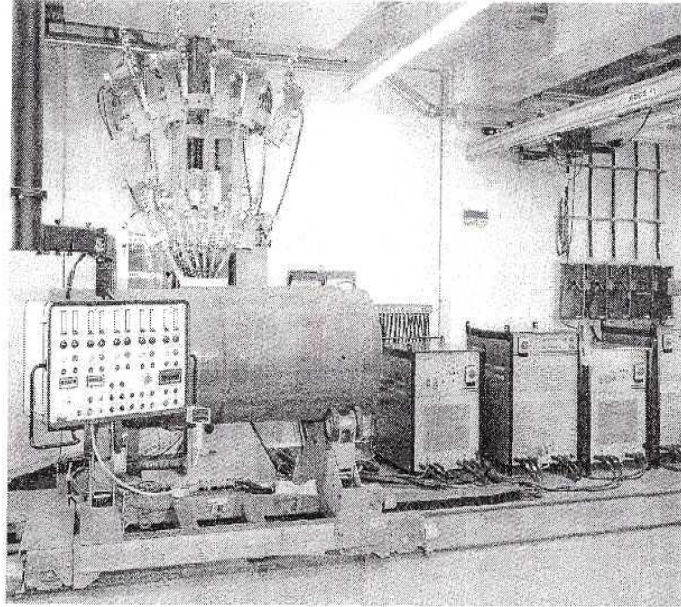
Gaz ve petrol iletim hatlarında, spiral dikişli borunun yanı sıra tozaltı kaynak yöntemi ile üretilen boyuna dikişli borular da oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, boru çapına uygun ölçülerde üretilmiş olan saç plakalar kullanılmaktadır. Söz konusu bu saç plakalar, özel yöntemlerle kıvrıldıktan sonra (U ve O kıvrırma), öncelikle oldukça yüksek bir hızda punto kaynağında tabi tutulmakta ve daha sonra, bağımsız istasyonlarda önce iç sonra dış kaynak yapılmaktadır. Gaz altı kaynak yöntemi ile yapılan punto kaynaklarında yaklaşık 6–7 m/dk gibi yüksek hızlara çıkıldığı için daha sonra yapılmakta olan iç ve dış kaynak istasyonlarının sayısı bu yüksek hızı karşılayacak sayıdadır [Mannesmann Röhrenwerke, 1986]. Şekil 4.6’da boyuna dikişli bir gaz borusunda iç kaynağın oluşumu, Şekil 4.7’de dış kaynak istasyon görünümü, Şekil 4.8’de ise boyuna dikişli boru üretim aşamaları görülmektedir [Şirin, 2004]. Bu yöntemin, spiral dikişli boru üretimine kıyasla bir dizi üstünlüğü vardır. Bunlar; kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Hem iç hem de dış kaynağın düz bir hat boyunca yapılması ile bir takım kaynak hatası oluşumları engellenebilmektedir. Özellikle, kaynak banyosunun akması nedeni ile oluşan biçim bozuklukları bu yöntemde tamamen ortadan kaldırılmıştır.
2. Geometrik kısıtlamaların ortadan kalkması nedeni ile aynı anda dört veya beş kafa birden kullanabilme imkânı 50 mm gibi oldukça kalın parçaların kaynak edilebilmesini olanaklı hale getirmektedir.
3. Çok sayıda kafa kullanımı nedeni ile spiral dikişli boru üretimine kıyasla oldukça yüksek üretim hızlarına çıkılabilmektedir.
4. Spiral dikişli borulara kıyasla, kaynak dikiş boyunun çok az olması, hem tel ve toz sarfiyatını azaltmakta hem de dikiş uzunluğunun az olması nedeni ile borunun basınç altındaki güvenilirliğini daha da arttırmaktadır.

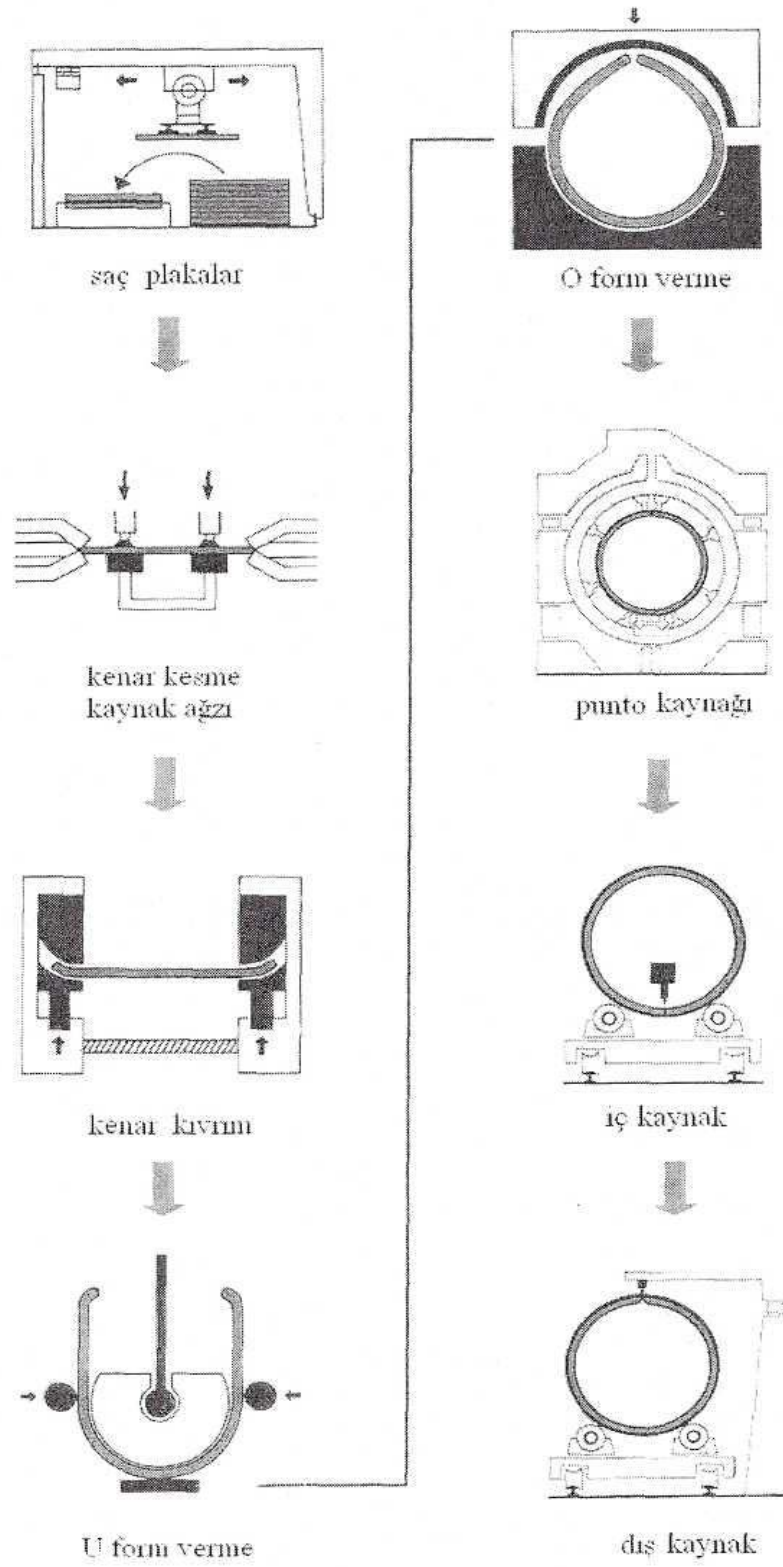
Ancak bu yöntemin yukarıda açıklanan tüm bu üstünlüklerinin yanı sıra, çok yüksek ve pahalı bir teknolojiye gereksinim göstermesi ve istenen ölçü ve kalınlıklarda sac plaka (yani hammadde) temininde zorlukların olması gibi bazı kısıtlamaları da vardır.



Şekil 4.6. Boyuna dikişli borularda iç kaynağın oluşumu



Şekil 4.7. Dış kaynak istasyonu görünümü



Şekil 4.8. Tozaltı kaynak yöntemi ile boyuna dikişli gaz borusu üretim aşamaları

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın amacı, petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanılan farklı malzemelerin mekanik performansının incelenerek kaynaklı birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkilerini araştırmak ve malzemeleri mukayese etmektir. Deneysel çalışmalarda, tozaltı kaynağı ile spiral dikişli olarak API 5L standardında X65, X52, X70, X60 doğalgaz boruları ve farklı ebatlarda X65 petrol borularına kaynaklı birleştirme işlemleri uygulanmış ve bu birleştirmelere kimyasal analiz, sertlik, çekme, çentik - darbe, eğme testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikro fotoğrafları çekilerek incelenmiştir.

5.1. Materyal ve Metod

5.1.1. Materyal

Deneylerde, sürekli döküm yolu ile imal edilmiş, termomekanik haddelemeye tabi tutulmuş, hidrojen kırılgenliğine karşı yüksek dirençli API 5L standartlarında X52, X60, X65 ve X70 çeliği kullanılmıştır. Bu malzemeler ülkemizde ve dünyanın çeşitli bölgelerindeki petrol ve doğalgaz iletim hatları için dünyanın önde gelen çelik üreticileri tarafından üretilmiştir. Deneylerde kullanılan X52 ve X65 malzemeden imal edilen doğalgaz boruları BOTAŞ, X60 malzemeden imal edilen doğalgaz borusu Cezayir, X70 malzemeden imal edilen doğalgaz borusu İsrail, X65 malzemeden imal edilen farklı kesit kalınlıklarındaki petrol boruları ise uluslararası bir proje olan BTC (Bakü – Tiflis – Ceyhan) Projesi için üretilmiştir. Çizelge 5.1’de kimyasal bileşimi verilen farklı kalitelere ve kesit kalınlıklarındaki sac malzemeler Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’de kimyasal analizi verilen S2Mo ve S3Mo türü kaynak teli ve Çizelge 5.4’de kimyasal analizi verilen P223 FX türü kaynak tozu kullanılmıştır. Birleştirmeler, Borusan Mannesmann Boru San. ve Tic. A.Ş.’nin İzmit’deki Fabrikasında Çizelge 5.5’deki değişken kaynak parametrelerine göre otomatik tozaltı kaynak makinasında yapılmış ve boru haline getirilmiştir.

Deneylerde kullanılan malzemelerden 11.91 mm kesit kalınlığındaki X65 petrol boru imalatında S3Mo tel kullanılmış, diğer malzemelerde ise S2Mo tel kullanılmıştır.

Resim 5.1’de deneylerde kullanılan kaynak makinesi görülmektedir. Bu kaynak makinesi; 323,8 mm (12”) - 2540 mm (100”) boru çap aralığında 4,0 ile 21,0 mm kesit kalınlığındaki boruları kaynatabilen, DC redresörler maksimum 1200 A akım, AC redresörler 385-895 A akım aralığında çalışabilen bir makinedir. Kullanılan kaynak hızı 0,25 ile 3,20 m/dk. arasında değişmektedir. İç kaynakta üç kafa dış kaynakta ise iki kafayı ayna anda kullanım olanağı vardır. Makinaların kaynak sistemine ait tüm elektriksel ekipmanları Lincoln Electric tarafından tasarlanmıştır. Tel sürme işlemi, DC redresörlerde Lincoln NA-3 ve AC redresörlerde ise Lincoln NA-4 kontrol sistemi ile gerçekleştirilmektedir.



Resim 5.1. Spiral boru üretiminde kullanılan kaynak makinesi

Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri

Malzeme	(36") 914x11,9 mm ebatlı doğalgaz boru üretiminde kullanılan, API 5L X 65 malzeme	(16") 406,4x6,4 mm ebatlı doğalgaz boru üretiminde kullanılan, API 5L X 52 malzeme	(24") 610x8,3 mm ebatlı doğalgaz boru üretiminde kullanılan, API 5L X 70 malzeme	(30") 762x8,74 mm ebatlı doğalgaz boru üretiminde kullanılan, API 5L X 60 malzeme	(42") 1067x11,91 mm ebatlı petrol boru üretiminde kullanılan, API 5L X 65 malzeme	(42") 1067x14,27 mm ebatlı petrol boru üretiminde kullanılan, API 5L X 65 malzeme
Element - % Analiz						
C	0,08	0,09	0,07	0,083	0,039	0,034
Si	0,16	0,22	0,22	0,22	0,19	0,24
Mn	1,56	0,93	1,59	1,45	1,1	1,35
P	0,012	0,010	0,013	0,007	0,014	0,002
S	0,004	0,004	0,002	0,004	0,001	0,001
Ni	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
Cr	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Cu	0,02	0,03	0,01	0,04	0,01	0,01
N	0,006	0,006	0,006	0,004	0,005	0,005
Al	0,032	0,035	0,033	0,042	0,032	0,030
Nb	0,050	0,028	0,061	0,047	0,054	0,046
Ti	0,023	0,001	0,024	0,020	0,0022	0,0115
C _{Es}	0,40	0,26	0,35	0,17	0,26	0,30

Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan S2Mo kaynak telinin kimyasal analizi

C	Mn	Si	P	S	Cr
0,10	1,03	0,12	0,006	0,007	0,07
Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V
0,05	0,48	0,08	0,003	0,003	0,01

Çizelge 5.3. Deneylerde kullanılan S3Mo kaynak telinin kimyasal analizi

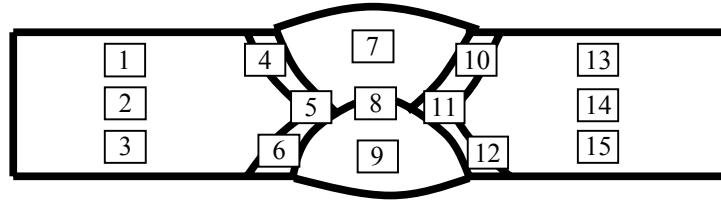
C	Mn	Si	P	S	Cr
0,09	1,65	0,16	0,008	0,006	0,02
Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V
0,02	0,51	0,03	0,002	0,002	0,01

Çizelge 5.4. Deneylerde kullanılan P223 FX türü kaynak tozunun kimyasal analizi

C	Si	Mn	P	S
0,08	0,38	1,36	<0,01	<0,01
Cu	Nb	Ti	V	W
0,10	0,18	1,01	0,012	<0,01

5.1.2. Metod

Borusan Mannesmann Boru San. ve Tic. A.Ş.'nin İzmit fabrikasında, Mannesmann-Demag marka kaynak makinasında Çizelge 5.5’de verilen parametreler dahilinde kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan kaynak işlemlerinden sonra numunelerin mikroyapı ve makroyapı fotoğrafları çekilerek çekme, sertlik, kimyasal analiz, eğme ve çentik – darbe (Charpy) testleri uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri için Şekil 5.1’de şematik olarak görüldüğü gibi her bir kaynaklı deney numunesinin üzerinden 15 ayrı noktadan sertlik değerleri alınmıştır.



Şekil 5.1. Sertlik numunelerinde seçilen sertlik ölçme bölgeleri

Çizelge 5.5. Deney parametreleri

Malzeme	Kaynak Bölgesi	Tel çapı (mm)	Hız (cm/dk)	Akım Tipi	Amper (A)	Ark Gerilimi (V)
API 5L X 65 kalite (36") 914x11,9 mm ebatlı doğalgaz borusu	İç Kaynak	4,0	220	DC +	900	29
		3,2	220	AC1	775	29
		3,2	220	AC2	500	30
	Dış Kaynak	4,0	220	DC +	900	29
		3,2	220	AC	750	29
		3,2	220	DC +	675	29
API 5L X 52 kalite (16") 406,4x6,4 mm ebatlı doğalgaz borusu	İç Kaynak	3,2	170	DC +	675	29
		3,2	170	DC +	700	29
		3,2	220	DC +	800	28
	Dış Kaynak	3,2	220	AC1	550	28
		3,2	220	DC +	800	28
		3,2	220	AC	450	28
(API 5L X 60 kalite 30") 762x8,74 mm ebatlı doğalgaz borusu	İç Kaynak	3,2	240	DC +	850	28
		3,2	240	AC1	600	29
		3,2	240	DC +	850	28
	Dış Kaynak	3,2	240	AC	500	29
		4,0	200	DC +	850	27
		3,2	200	AC1	700	27
API 5L X 65 kalite (42") 1067x11,91 mm ebatlı petrol borusu	İç Kaynak	3,2	200	AC2	475	29
		3,2	200	DC +	850	29
		3,2	200	AC	575	29
	Dış Kaynak	4,0	180	DC +	800	27
		3,2	180	AC1	725	27
		3,2	180	AC2	500	28
API 5L X 65 kalite (42") 1067x14,27 mm ebatlı petrol borusu	İç Kaynak	3,2	180	DC +	875	29
		3,2	180	AC	650	29
		3,2	180	DC +	875	29
	Dış Kaynak	3,2	180	AC	650	29

Metalografik uygulama

Çizelge 5.5'deki sabit ve değişken kaynak parametrelerine bağlı kalınarak yapılan deneylerden sonra her bir malzemenin mikroyapı - makroyapı fotoğraflarının çekilebilmesi ve sertlik ölçümlerinin alınabilmesi için deney numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler, standart metalografik numune hazırlama kurallarına uygun olarak sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış, daha sonra % 3 Nital çözeltisiyle dağlanmıştır. Dağlanan bu numunelerin mikroyapı fotoğrafları PRIOR marka optik mikroskop yardımıyla çekilmiştir. Mikroyapı fotoğrafları çekilen numuneler, daha sonra sertlik ölçme işlemlerinde kullanılmıştır. Sertlik deneyleri Struers marka, Duramin A300 model, 0,100 – 31.250 kg kapasiteli, tam pinomatik, değişken yüke sahip, Vickers, Brinell, Rockwell cinsinden makro ve mikro ölçümler yapabilen bir cihaz yardımıyla yapılmıştır. Sertlik ölçme işleminde Vickers sertlik ölçme metodu kullanılmış ve yük olarak da boru imalatçıların kullandığı 10 kilogramlık bir ağırlık seçilmiştir.

Çekme numunesi hazırlama

Çizelge 5.5'de verilen parametreler dâhilinde otomatik tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen parçalardan ve ana malzemedan ASTM E8 standardına uygun olarak ana malzeme ve kaynaklı çekme numuneleri olmak üzere her bir malzeme için 2, toplamda ise 12 adet çekme numunesi hazırlanmıştır.



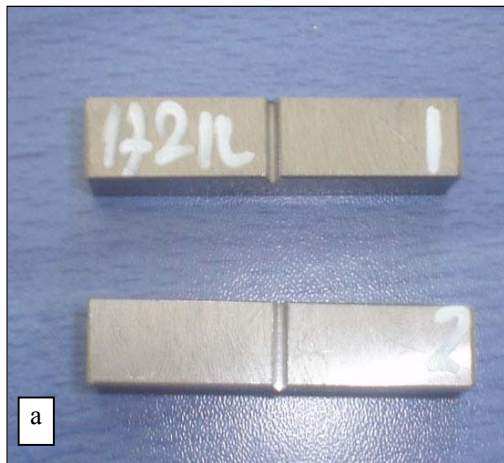
Resim 5.2.a) Çekme deney numuneleri

b) Çekme cihazı

Deneylerde ana malzeme ve kaynaklı birleştirmelerin maksimum çekme mukavemeti ve % uzama değerlerine bakılmıştır. Deneylerde kullanılan çekme cihazı Zwick - Roel marka olup 600 KN yük kapasitesine sahiptir. Resim 5.2’de çekme deney numuneleri ve çekme deneyinin yapıldığı çekme cihazı görölmektedir.

Çentik - darbe numunesi hazırlama

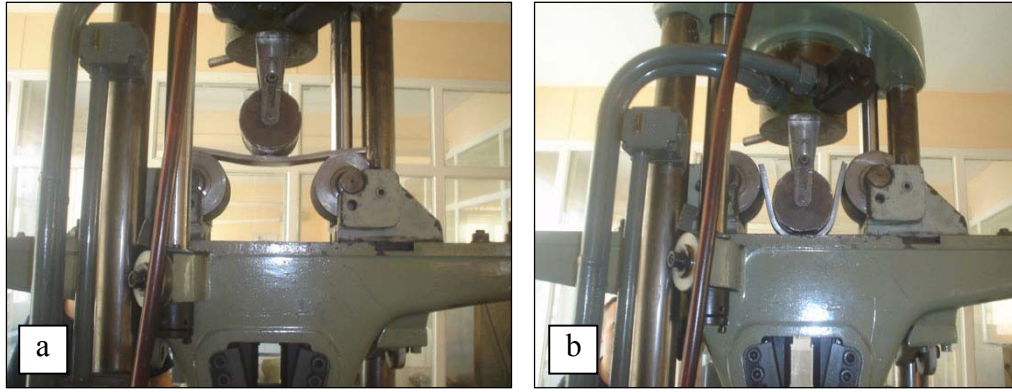
Çentik - darbe deneyleri maksimum 300 Joule enerji ölçebilen ve çarpma hızı 5,42 m/sn olan bir cihaz yardımı ile yapılmış olup, çentik - darbe deney numuneleri DIN 50115’e göre sivri çentikli ISO-V şeklinde hazırlanmıştır. Numune soğutması sıvı banyo içinde $\pm 0,5$ °C hassasiyet ile yapılmış olup, sıvı banyo içinde tutulma süresi 7 dakikadır. Deneyler, -20°C’de yapılmış olup numuneler cihaza çentik eksenini mesnet açıklığının tam ortasında ve çentikli yüzün çekicinin vuracağı yüzün ters tarafında olacak şekilde yapılmıştır. Deneylerde ana malzemeden ve kaynak bölgesinden alınan 3’er adet toplam 18 adet numunenin çentik - darbe sonuçları alınmış olup ortalamaları hesaplanarak çentik - darbe deney sonucu olarak verilmiştir. Resim 5.3’de çentik - darbe deney numuneleri ve çentik - darbe cihazı görölmektedir.



Resim 5.3.a) Çentik - darbe numuneleri b) Çentik - darbe cihazı

Eğme numunesi hazırlama

Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen malzemelerden EN 910 standardına uygun olarak eğme deneyi numuneleri hazırlanarak eğme işlemine tabi tutulmuştur. Eğme işlemleri iki ayrı yönde olmak üzere 180° açığa kadar yapılmıştır. Eğme deneyinin yapılışı Resim 5.4’de fotoğraf halinde görülmektedir.



Resim 5.4. Eğme deney görüntüleri, a) Eğme testi başlangıcı, b) Eğme testi bitişi

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Doğalgaz ve petrol boru imalatında kullanılan farklı çap ve kesit kalınlıklarında X52, X60, X65 ve X70 malzemeler kaynak işlemine tabi tutulmuş ve bu numunelere çeşitli mekanik testler ve mikroyapı incelemeleri uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda ayrı ayrı ele alınmış ve tartışılmıştır.

6.1. Deney Sonuçları

6.1.1. API 5 L X65 doğalgaz boru numunelerine ait deney sonuçları

Çizelge 5.5’de verilen kaynak parametrelerine uygun olarak 914 mm çapında, 11,90 mm kesit kalınlığında ve X65 kalitesindeki borunun imalatı için kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen birleştirmenin mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Kaynaklı bölgenin kimyasal analizi, makroyapı fotoğrafı, mikroyapı fotoğrafları, sertlik grafiği, çekme, çentik - darbe ve eğme sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

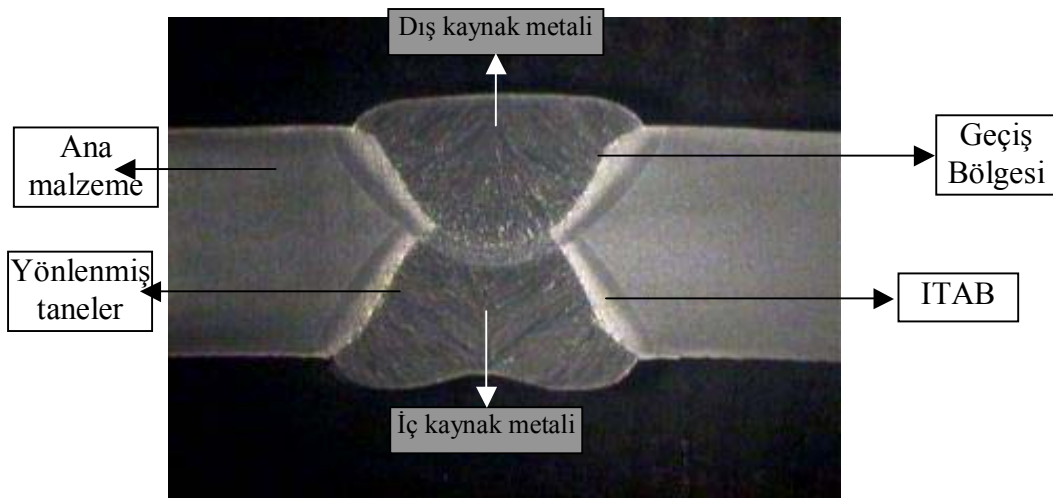
Çizelge 6.1’de verilen kaynaklı bölgenin kimyasal analiz sonucuna bakıldığında ana malzeme, kullanılan dolgu teli ve tozun ortalama kompozisyonuna sahip bir bileşim %’si görülmektedir.

Çizelge 6.1. API 5L X65 malzeme kaynak metali kimyasal analizi (11,90 mm).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Element	0,10	0,30	1,53	0,018	0,006	0,049	0,042
(%)	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	V
	0,215	0,06	0,008	0,039	0,037	0,009	0,037

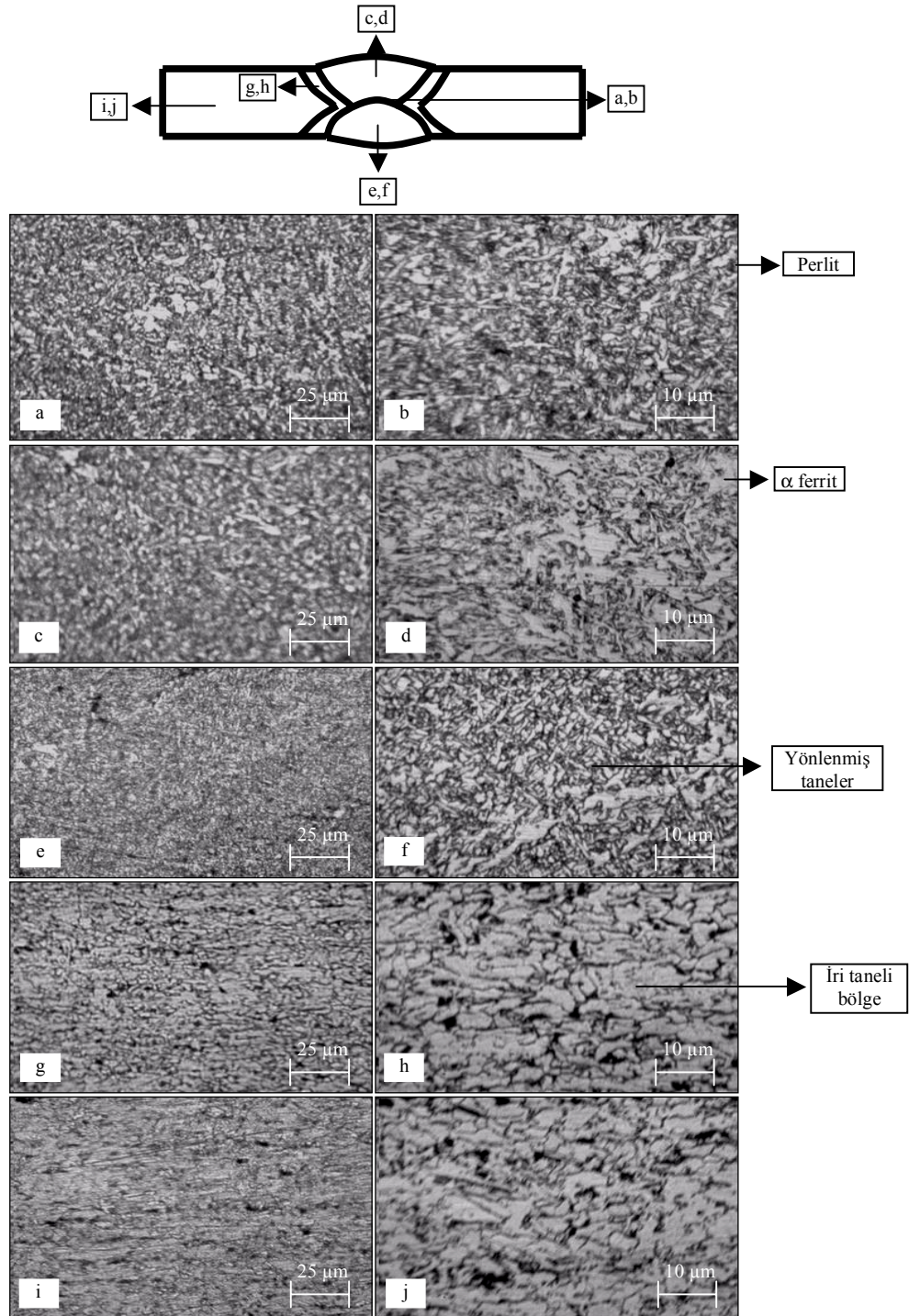
Resim 6.1’de verilen makroyapı fotoğrafına bakıldığında herhangi bir kaynak hatasının (yanma oluşu, çatlak, gözenek, kalıntı, v.b.) olmadığı ayrıca ana malzeme,

ITAB ve kaynak metalı bölgeleri belirgin bir şekilde görülmektedir. Yine makroyapı fotoğrafından, kaynak metalı tanelerinin ısı akış yönüne ters yönde yönlendiği, nüfuziyetin tam olduğu ve birleşmemiş bölgenin olmadığı görülmektedir. Birleştirme işleminde iç kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönlenmeler ana malzemeye ters yönde gerçekleşirken, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönlenmeler ana malzemeye ve iç kaynağa ters yönde oluşmuştur.



Resim 6.1. Kaynağın makro görüntüsü (X65, 11,90 mm).

Resim 6.2’de x400 ve x1000 büyütme olarak ana malzeme, ITAB ve kaynak metalı mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. ITAB da ana malzemeye oranla daha iri tanelerin olduğu, kaynak metalinde ise kaynak esnasında oluşan yüksek türbülansın dolayı tanelerin diğer bölgelere oranla çok daha homojen bir şekilde ve daha ince tanelerden olduğu görülmektedir. Ayrıca, dış kaynağın iç kaynaktan daha sonra yapılması dış kaynak için bir ön tavlama işlemi görmüş ve dış kaynaktaki kaynak metalı taneleri daha iri bir şekilde oluşmuş ve ısı akış yönüne ters bir şekilde yönlendiği görülebilmektedir.



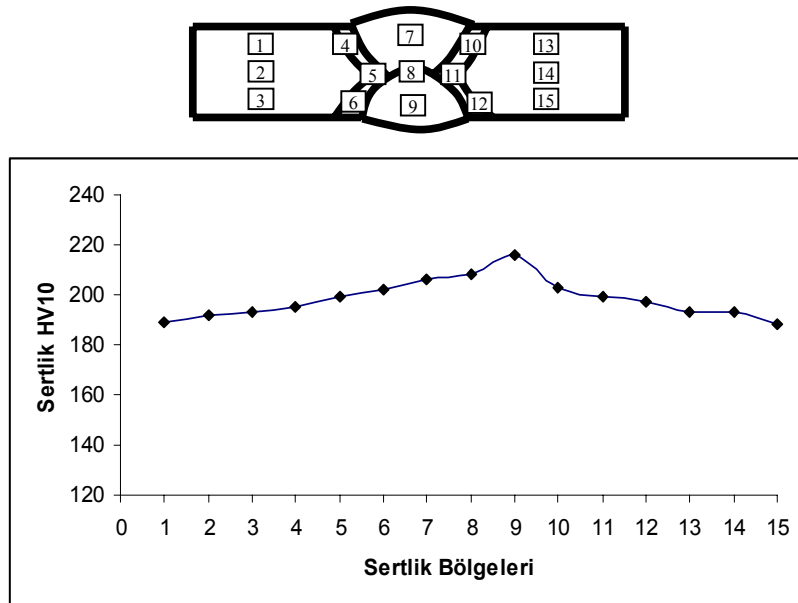
Resim 6.2. X65 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları a,b) İç ve dış kaynak birleşim noktası (x400, x1000), c,d) Dış kaynak (x400, x1000), e,f) İç kaynak (x400, x1000), g,h) Isının tesiri altındaki bölge (ITAB) (x400, x1000), i,j) Ana malzeme (x400, x1000)

Çizelge 6.2 incelendiğinde ana malzemenin çekme mukavemetinin 627 N/mm^2 , kaynakla birleştirilmiş parçanın çekme mukavemetinin ise 674 N/mm^2 olurken % uzama değerlerinin ise ana malzemede % 33, kaynaklı malzemede de % 11 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.2. X65 malzemeye ait çekme testi sonuçları (11,90 mm)

Malzeme	Max. Çekme Dayanımı (N/mm^2)	% Uzama
Ana malzeme	627	33
Kaynaklı malzeme	674	11

Şekil 6.1’de 15 ayrı bölgeden alınan sertlik sonuçları grafik halde gösterilmektedir. Gösterilen sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu, en düşük sertliğin ise kaynak metalinin yanında olduğu görülmektedir. Kaynak metali sertliğinin yaklaşık 210 HV olduğu, ana malzeme sertliğinin ise ilk sertlik değeri olan yaklaşık 190 HV değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.1. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X65, 11,90).

Çizelge 6.3'de -20°C 'de yapılan çentik - darbe deneyi sonucunda elde edilen değerler ve ortalamaları verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 210 Joule, kaynak metalinin ise 137 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.3. X65 malzemeye ait çentik - darbe deney sonuçları (11,90 mm)

Malzeme	Enerji(Joule)			
	Test sıcaklığı: -20°C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana malzeme	209	211	209	210
Kaynaklı bölge	138	129	144	137

Kaynakla birleştirilmiş parçalardan elde edilen eğme deney numunelerine uygulanan eğme işlemleri sonucu Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. X65 malzemeye ait eğme testi sonuçları (11,90 mm)

Mil Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dış kaynak dışarıda		Dış kaynak içeride	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
95	122	180°	Hata yok	180°	Hata yok

6.1.2. API 5 L X52 doğalgaz boru numunelerine ait deney sonuçları

406,4 mm çapında, 6,40 mm kesit kalınlığında ve X52 kalitesindeki borunun imalatı için seçilen kaynak parametreleri Çizelge 5.5'de verilmiştir. Verilen kaynak parametrelerine uygun olarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen birleştirmenin mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Kaynak metalinin kimyasal analizi, makroyapı ve mikroyapı fotoğrafları, sertlik grafiği, çekme, çentik - darbe ve eğme sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Kaynak metalinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 6.5’de verilmiştir. Verilen kimyasal bileşime bakıldığında elde edilen bileşim %’sinin, ana malzemenin ve kullanılan dolgu teliyle tozun ortalama kompozisyonuna sahip bir bileşim olduğu görülmektedir.

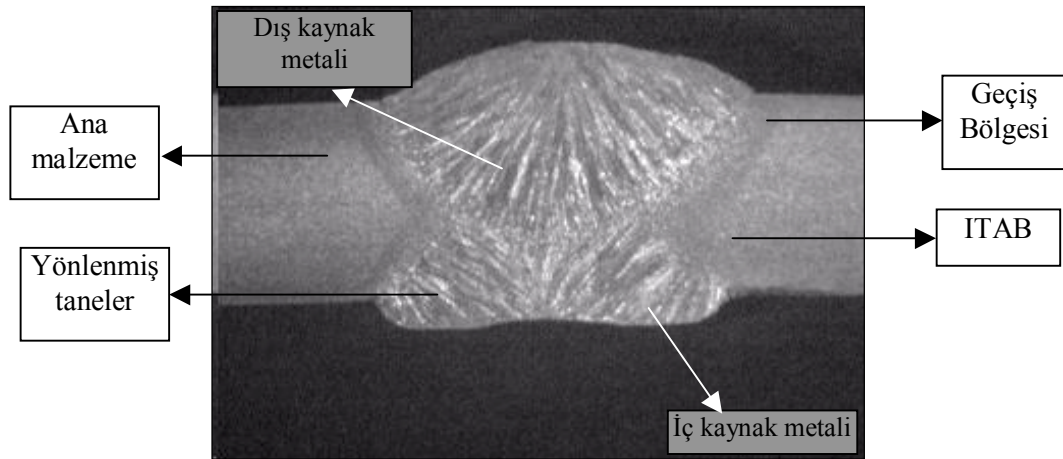
Çizelge 6.5. API 5L X52 malzeme kaynak metalinin kimyasal analizi

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Element	0,10	0,24	1,05	0,012	0,005	0,014	0,019
(%)	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	V
	0,24	0,04	0,007	0,027	0,025	0,005	0,025

Resim 6.3’de X52 malzemenin makroyapı fotoğrafı verilmiştir. Verilen makroyapı fotoğrafında nüfuziyetin tam olduğu ve birleşmemiş herhangi bir bölgenin olmadığı tespit edilmiş olup herhangi bir kaynak hatasının (yanma oluğu, çatlak, gözenek, kalıntı, v.b.) olmadığı görülmektedir. Birleştirme işleminde iç kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönelmeler ana malzemeye ters yönde gerçekleşirken, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönelmeler ana malzeme ve iç kaynağa ters yönde oluşmuştur. Ayrıca ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgeleri belirgin bir şekilde görülebilmektedir. X52 malzemesinin kesit kalınlığının daha önce incelenen X65 malzemesinin yaklaşık yarısı kadar olması kaynak bölgesinin daha geniş bir alana yayılmasına neden olduğu ve aşağıdaki makro fotoğraftan da açık bir şekilde ITAB’ın daha geniş bir alanda olduğu görülebilmektedir.

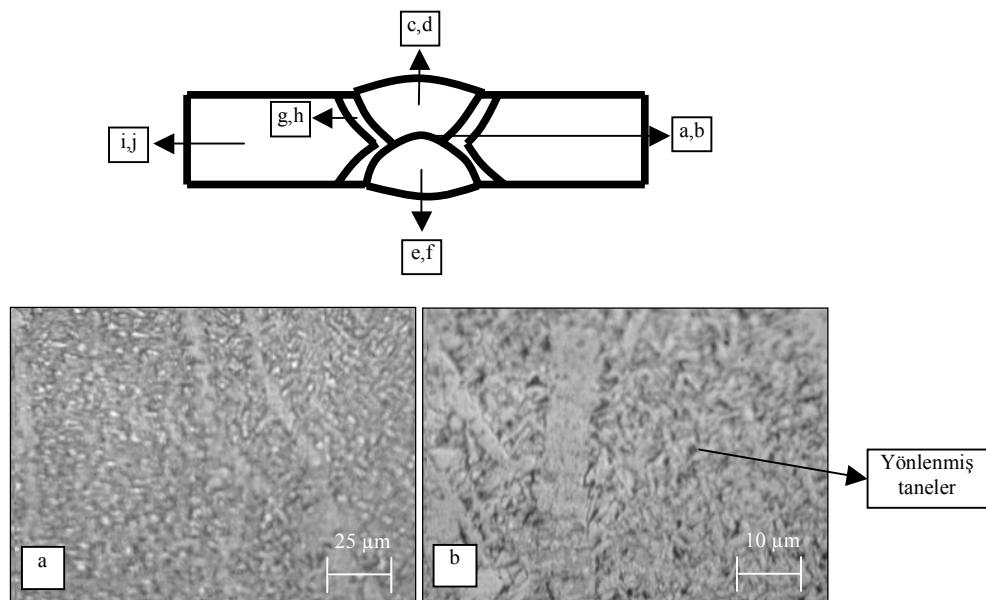
Resim 6.4’de x400 ve x1000 büyütme olarak verilmiş olan ana malzeme, ITAB ve kaynak metali mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, ITAB da ana malzemeye göre daha iri tanelerin olduğu görülmektedir. Kaynak metalinde ise tane yapısı olarak klasik kaynak metalindeki dendritik yapının hakim olduğu belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Tanelerin ısı akış yönüne ters yönde olacak şekilde olduğu

görülürken yüksek türbülansın etkisiyle tane yapısının diğer bölgelere oranla daha homojen bir şekilde ve daha ince olarak dağıldığı görülmektedir.

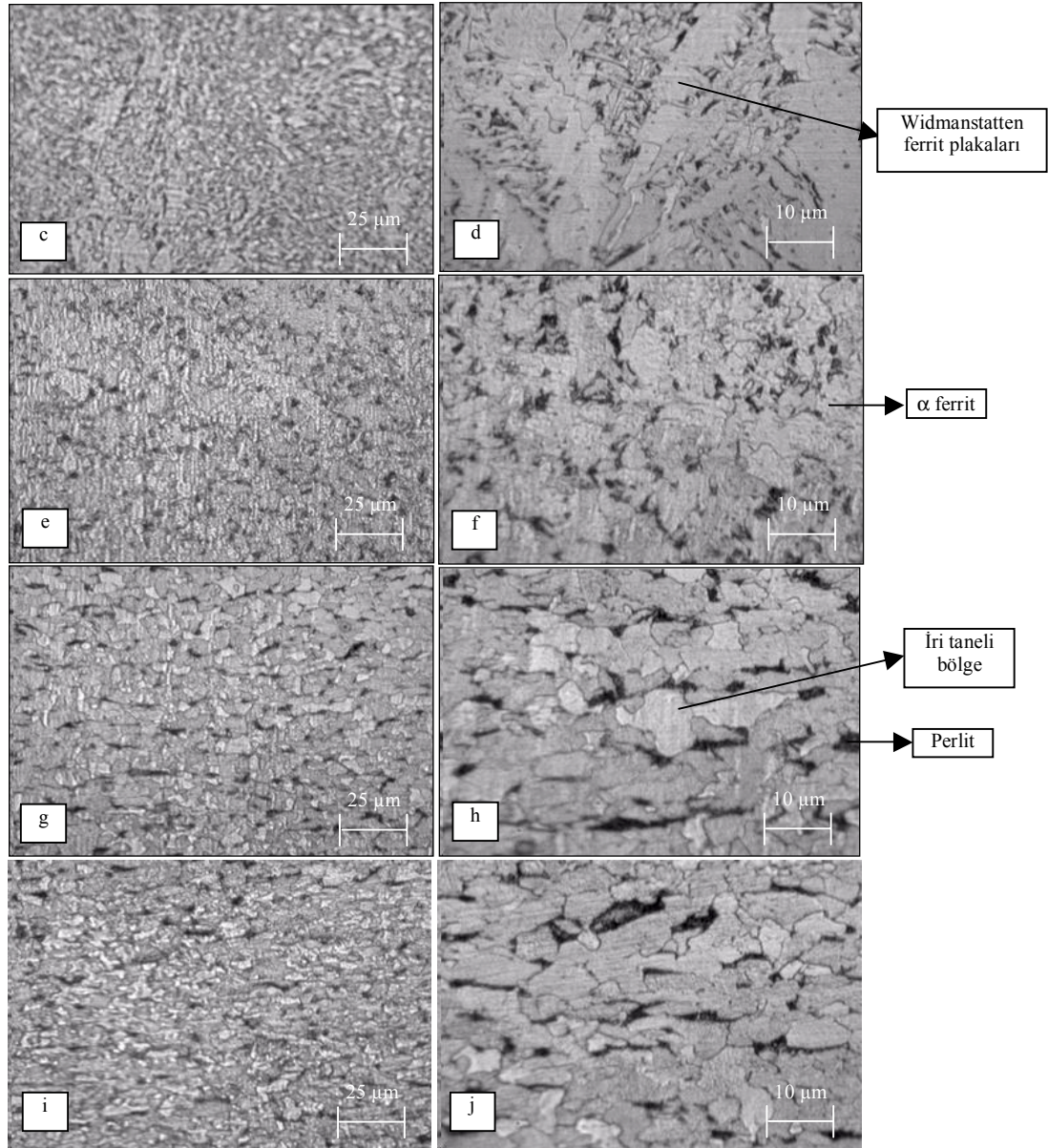


Resim 6.3. Kaynağın makro görüntüsü (X52)

Dış kaynak metalinde oluşan tanelerin iç kaynak metalinde oluşan tanelere göre daha ince yapıda olduğu da makroyapı fotoğraflarında belirgin bir şekilde görülmektedir.



Resim 6.4. X52 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları a,b) İç ve dış kaynak birleşim noktası (x400, x1000)



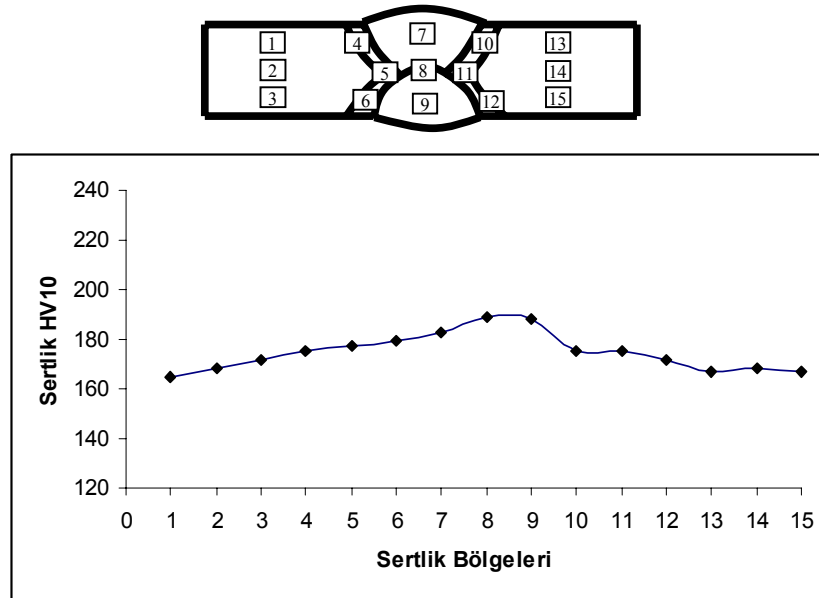
Resim 6.4. (Devam) X52 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları c,d) Dış kaynak (x400, x1000), e,f) İç kaynak (x400, x1000), g,h) Isının tesiri altındaki bölge (ITAB) (x400, x1000), i,j) Ana malzeme (x400, x1000)

Çizelge 6.6’da X52 malzemesine ait çekme deney sonuçları verilmiştir. Verilen bu sonuçlar incelendiğinde ana malzemenin çekme mukavemetinin 515 N/mm^2 , kaynakla birleştirilmiş parçanın çekme mukavemetinin ise 557 N/mm^2 olduğu görülürken, % uzama değerlerinin ise ana malzemede % 34, kaynaklı malzemede de % 20 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.6. X52 malzemeye ait çekme deneyi sonuçları

Malzeme	Max. Çekme Dayanımı Rm (N/mm ²)	% Uzama
Ana malzeme	515	34
Kaynaklı malzeme	557	20

X52 malzemenin sertlik grafiği ise Şekil 6.2’de verilmiştir. Verilen sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak bölgesinde olduğu, en düşük sertliğin ise kaynak metalinin yanında olduğu görülmektedir. Kaynak metalinin sertliğinin yaklaşık 190 HV olduğu, ana malzeme sertliğinin ise malzemenin orijinal sertlik değeri olan yaklaşık 170 HV olduğu görülebilmektedir.



Şekil 6.2. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X52).

-20 °C’de gerçekleşen çentik - darbe deneyleri sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.7’de verilmiştir. Çentik - darbe deney sonuçlarına göre ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 182 Joule, kaynak metalinin ise 148 Joule olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.7. X52 malzemeye ait çentik - darbe deney sonuçları

Malzeme	Enerji(Joule)			
	Test sıcaklığı:-20°C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana malzeme	181	177	187	182
Kaynaklı bölge	156	144	143	148

Kaynakla birleştirilmiş parçalardan elde edilen eğme deney numunelerine uygulanan eğme işlemleri sonucu Çizelge 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.8. X52 malzemeye ait eğme testi sonuçları

Mil Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dıştan içe		İçten dışa	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
55	71	180°	Hata yok	180°	Hata yok

6.1.3. API 5 L X70 doğalgaz boru numunelerine ait deney sonuçları

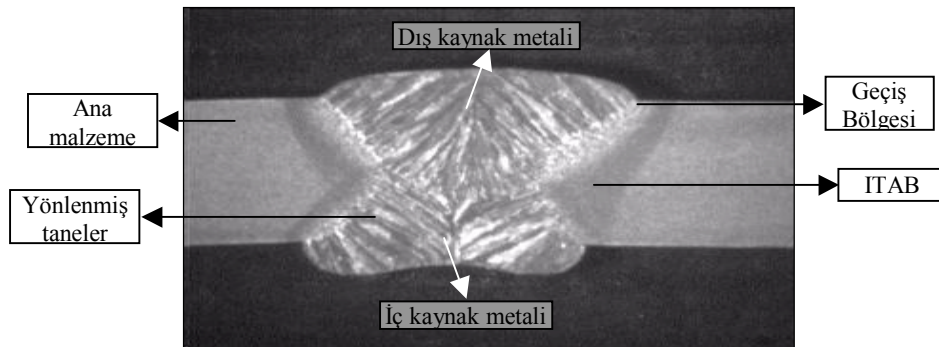
Çizelge 5.5’de verilen kaynak parametrelerine uygun olarak 610 mm çapında, 8,30 mm kesit kalınlığında ve X70 kalitesindeki borunun imalatı için kaynakla birleştirme işlemi gerçekleştirilmiş olup, gerçekleştirilen birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özellikleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 6.9, X70 malzemesine ait kaynak metali kimyasal bileşimini içermektedir. Verilen kimyasal bileşime bakıldığında ana malzeme, kullanılan dolgu teli ve kaynak tozunun ortalama kompozisyonuna sahip bir bileşimin oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 6.9. API 5L X70 malzeme kaynak metalinin kimyasal analizi

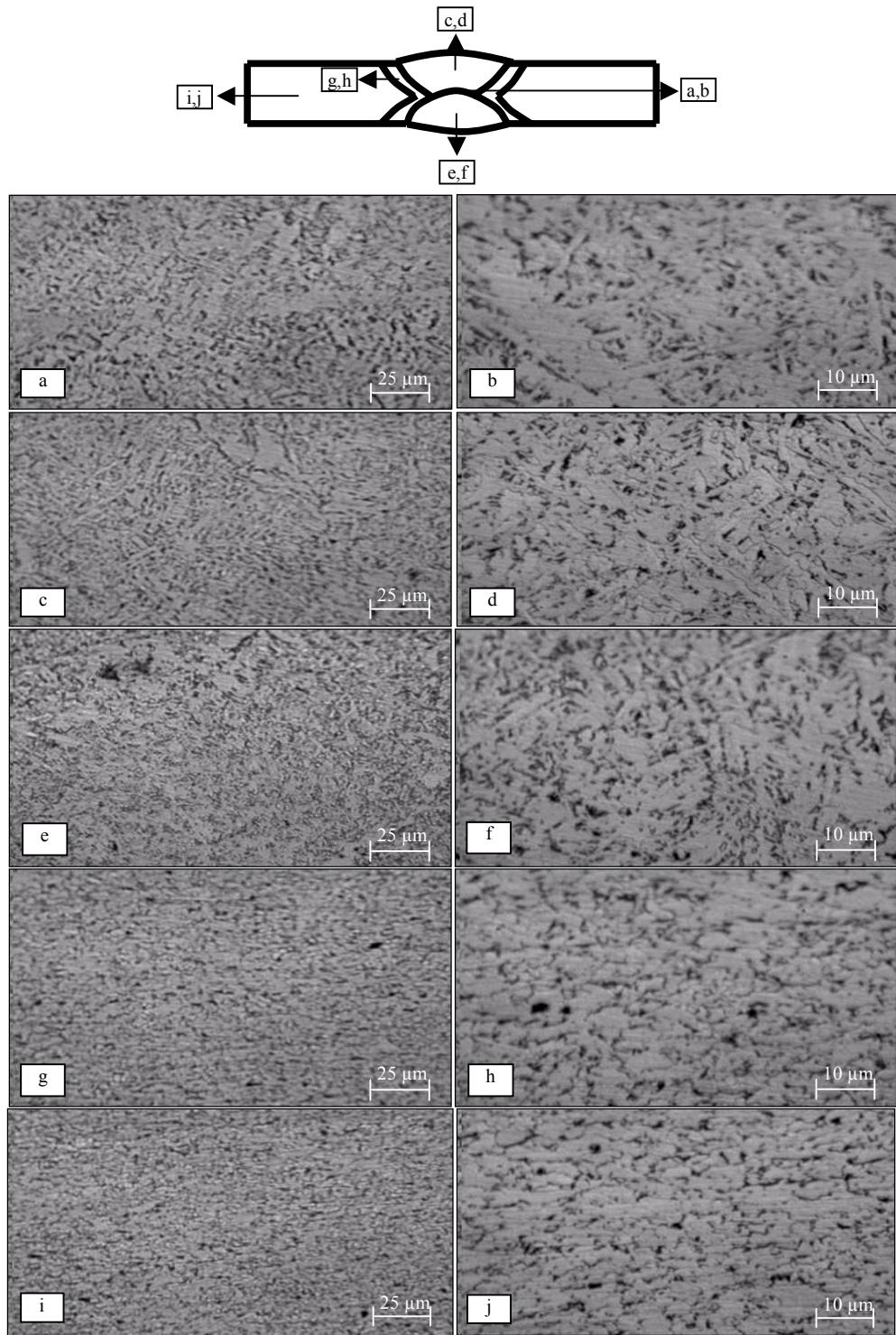
Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
(%)	0,08	0,24	1,48	0,010	0,003	0,02	0,02
	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	V
	0,19	0,05	0,007	0,029	0,048	0,015	0,043

Resim 6.5’de verilen X70 malzemesinin makroyapı fotoğrafına bakıldığında herhangi bir kaynak hatasının (yanma oluğu, çatlak, gözenek, kalıntı, v.b.) olmadığı ayrıca ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgelerinin belirgin bir şekilde ayrıtı edilebildiği görülmektedir. Yine makroyapı fotoğrafından, kaynak metali tanelerinin ısı akış yönüne ters yönde yönlendiği, nüfuziyetin tam olduğu ve birleşmemiş bölgenin olmadığı görülebilmektedir. Yine bu malzemenin birleştirme işleminde iç kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönlenmeler ana malzemeye ters yönde, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönlenmeler ise ana malzeme ve iç kaynağa ters yönde oluşmuştur.



Resim 6.5. Kaynağın makro görüntüsü (X70)

Resim 6.6’da x400 ve x1000 büyütme olarak ana malzeme, ITAB ve kaynak metali mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Verilen mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında kaynak metalinde oluşan yapının çok ince tanelerden meydana geldiği ve iğnemsî bir yapının oluştuğu görülmektedir. Kaynak metalinde oluşan taneler yine ısı akış yönüne ters yönde olacak şekilde yönlendirilmiş ve kısmen dendritik yapının oluştuğu da görülebilmektedir.

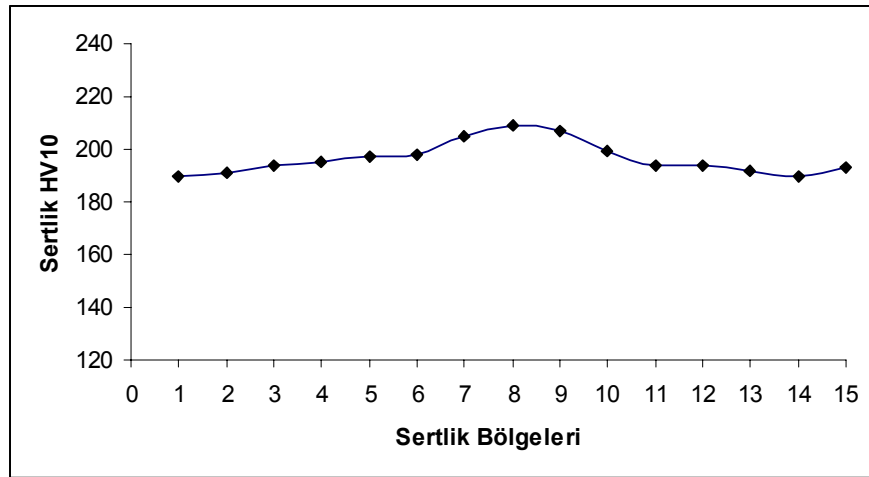
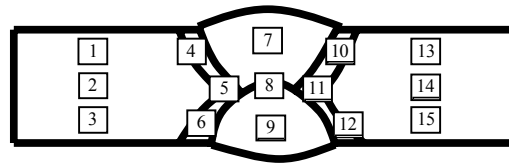


Resim 6.6. X70 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları a,b) İç ve dış kaynak birleşim noktası (x400, x1000), c,d) Dış kaynak (x400, x1000), e,f) İç kaynak (x400, x1000), g,h) Isının tesiri altındaki bölge (ITAB) (x400, x1000), i,j) Ana malzeme (x400, x1000).

Çizelge 6.10 incelendiğinde ana malzemenin çekme mukavemetinin 653 N/mm^2 , kaynakla birleştirilmiş parçanın çekme mukavemetinin ise 713 N/mm^2 olduğu görülürken % uzama değerlerinin ise ana malzemede % 31, kaynaklı malzemede de % 17 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.10. X70 malzemeye ait çekme testi sonuçları

Malzeme	Max. Çekme Dayanımı $R_m \text{ (N/mm}^2\text{)}$	% Uzama
Ana malzeme	653	31
Kaynaklı malzeme	713	17



Şekil 6.3. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X70).

Çizelge 6.11’de $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de yapılan çentik - darbe deneyi sonucunda elde edilen değerler ve ortalama sonuçlar verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 243 Joule, kaynak metalinin ise 131 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.11. X70 malzeme çentik - darbe deney sonuçları

Malzeme	Enerji(Joule)			
	Test sıcaklığı:-20°C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana malzeme	251	236	243	243
Kaynaklı bölge	147	122	125	131

Kaynakla birleştirilmiş parçalardan elde edilen eğme deney numunelerine ait sonuçlar Çizelge 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.12. X70 malzeme eğme testi sonuçları

Mil Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dıştan içe		İçten dışa	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
95	115	180°	Hata yok	180°	Hata yok

6.1.4. API 5 L X60 doğalgaz boru numunelerine ait deney sonuçları

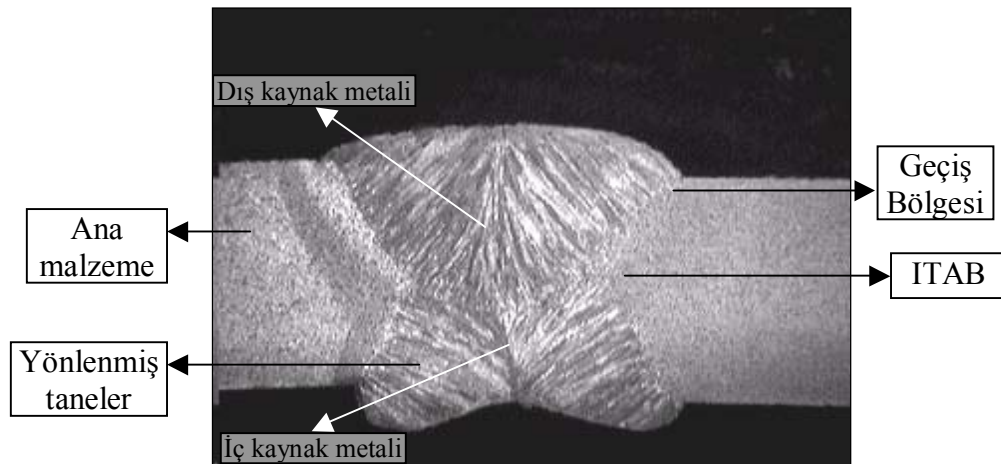
762 mm çapında, 8,74 mm kesit kalınlığında ve X60 kalitesindeki doğalgaz borusunun imalatı için gerekli kaynak parametreleri Çizelge 5.5’de verilmiş ve bu parametrelere uygun olarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen birleştirmenin mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır.

Çizelge 6.13’de verilen kaynaklı bölgenin kimyasal analiz sonucuna bakıldığında elde edilen kaynak metali bileşiminin ana malzeme, kullanılan dolgu teli ve kaynak tozunun ortalama kompozisyonuna sahip bir bileşim olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.13. API 5L X60 malzeme kaynak metalinin kimyasal analizi

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
(%)	0,09	0,24	1,42	0,09	0,005	0,02	0,02
	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	V
	0,22	0,04	0,006	0,035	0,042	0,021	0,039

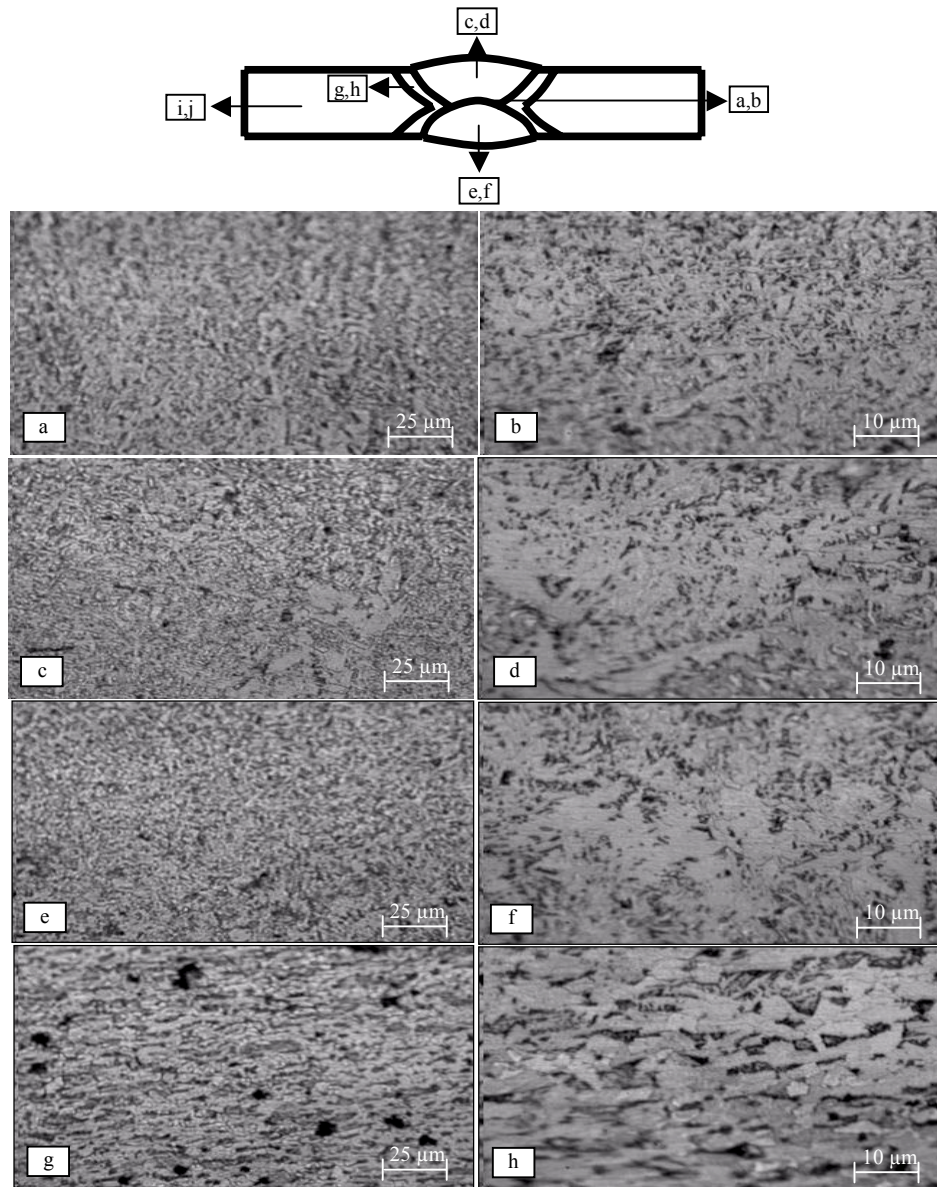
Resim 6.7’de verilen makroyapı fotoğrafına bakıldığında herhangi bir kaynak hatasının (yanma oluğu, çatlak, gözenek, kalıntı, v.b.) ve birleşmemiş bölgenin olmadığı, nüfuziyetin tam olduğu görülmektedir. Yine makroyapı fotoğrafından ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgeleri belirgin bir şekilde ayırt edilebilirken kaynak metali tanelerinin ısı akış yönüne ters olacak şekilde yönlendiği de görülebilmektedir. Birleştirme işleminde iç kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönelmeler ana malzemeye ters yönde gerçekleşirken, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönelmelerin ise ana malzeme ve iç kaynağa ters yönde olduğu görülebilmektedir.



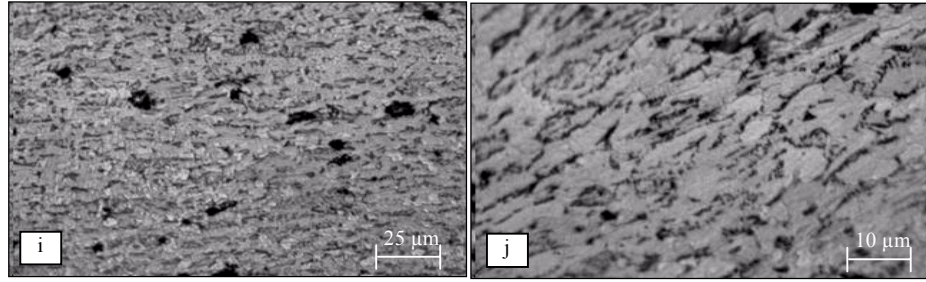
Resim 6.7. Kaynağın makro görüntüsü (X60)

Resim 6.8’de x400 ve x1000 büyütme olarak ana malzeme, ITAB ve kaynak metali mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. ITAB da ana malzemeye oranla daha iri tanelerin olduğu, kaynak metalinde ise kaynak esnasında oluşan yüksek türbülansın dolayı

tanelerin diğer bölgelere oranla çok daha homojen bir şekilde ve daha ince tanelerden oluştuğu görülmektedir. Kaynak metali tane yapısının yer yer dendritik yapıdan oluştuğu da belirgin bir şekilde görüldüğü gibi, dış kaynakta oluşan kaynak metali tanelerinin iç kaynağa göre daha iri bir şekilde oluştuğu ve ısı akış yönüne ters bir şekilde yönlendiği görülebilmektedir.



Resim 6.8. X60 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları. a,b) İç ve dış kaynak birleşim noktası (x400, x1000), c,d) Dış kaynak (x400, x1000), e,f) İç kaynak (x400, x1000), g,h) Isının tesiri altındaki bölge (ITAB) (x400, x1000),



Resim 6.8. (Devam) X60 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları. i,j)Ana malzeme (x400, x1000)

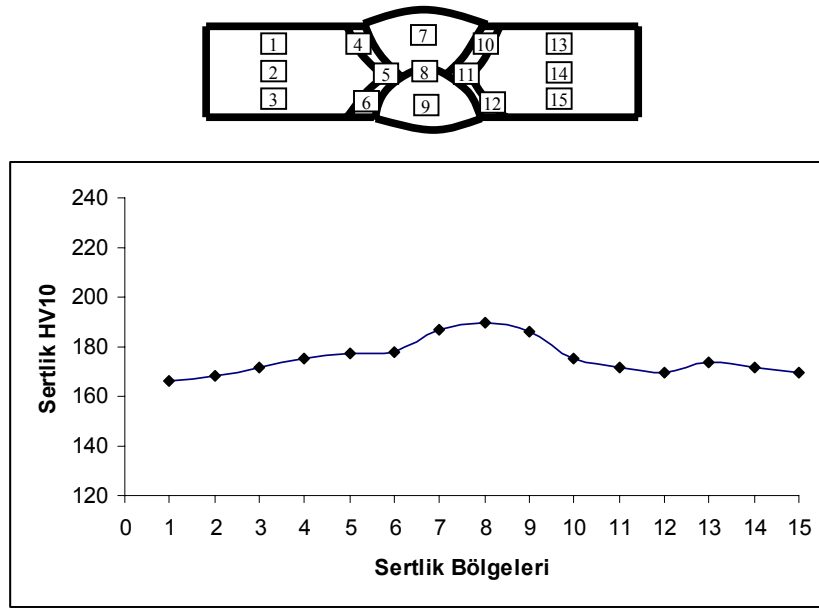
Çizelge 6.14’de verilen X60 malzemesine ait çekme deneyi sonuçları incelendiğinde kaynaklı birleştirmenin çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımından yüksek olduğu görülmektedir. Ana malzemenin çekme mukavemeti 558 N/mm^2 , kaynaklı malzemenin çekme mukavemeti 598 N/mm^2 ’dir. Yine bu malzemelere ait % uzama değerleri ise ana malzemede % 33, kaynaklı malzemede % 16 olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.14. X60 malzemeye ait çekme testi sonuçları

Malzeme	Max. Çekme Dayanımı $R_m \text{ (N/mm}^2\text{)}$	% Uzama
Ana malzeme	558	33
Kaynaklı malzeme	598	16

Şekil 6.4’te verilen sertlik grafiğinde en yüksek sertlik değerinin kaynak metalinde olduğu, en düşük sertliğin ise kaynak metalinin yanında olduğu net bir şekilde görülmektedir. Kaynaklı malzemenin sertliğinin yaklaşık 190 HV olduğu, ana malzeme sertliğinin ise yaklaşık 170 HV olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 6.15’de verilen ve $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de yapılan çentik - darbe deneyi sonucundan elde edilen değerlerde ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 142 Joule, kaynak metalinin ise 91 Joule olduğu görülmektedir.



Şekil 6.4. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X60).

Çizelge 6.15. X60 malzemeye ait çentik - darbe deney sonuçları

Malzeme	Enerji(Joule)			
	Test sıcaklığı:-20°C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana malzeme	146	140	140	142
Kaynaklı bölge	96	89	89	91

Kaynakla birleştirilmiş parçalardan elde edilen eğme deney sonuçları Çizelge 6.16’da verilmiştir.

Çizelge 6.16. X60 malzemeye ait eğme deneyi sonuçları

Mil Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dıştan içe		İçten dışa	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
78	99	180°	Hata yok	180°	Hata yok

6.1.5. API 5L X65 petrol boru numunelerine ait deney sonuçları

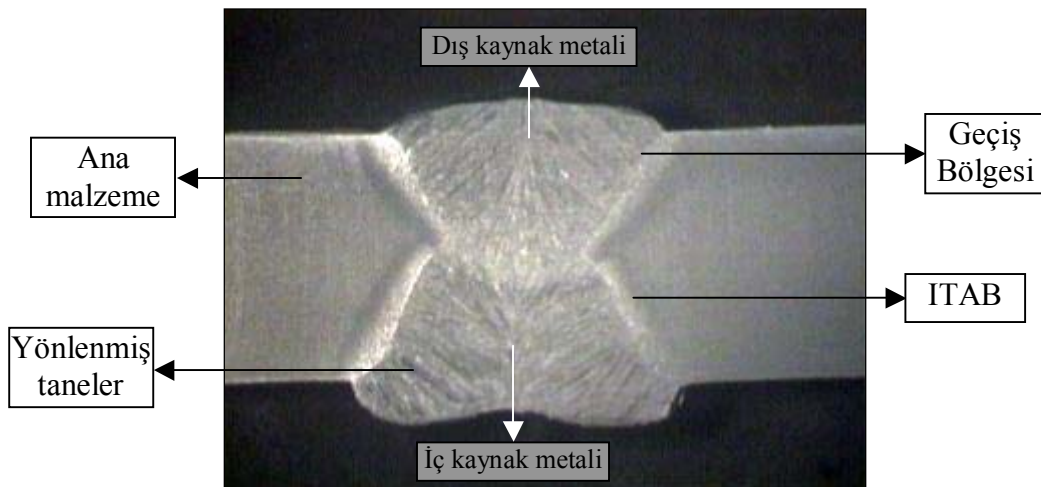
Çizelge 5.5’de verilen kaynak parametrelerine uygun olarak 1067 mm çapında, 11,91 mm kesit kalınlığında ve X65 kalitesindeki borunun imalatı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmenin mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır.

Kaynak metalinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 6.17’de verilmiştir. Verilen kimyasal bileşime bakıldığında elde edilen bileşim %’sinin, ana malzeme, kullanılan dolgu teli ve kaynak tozunun ortalama kompozisyonuna sahip bir bileşim %’sine sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.17. API 5L X65 malzeme kaynak metalinin kimyasal analizi (11,91 mm).

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
(%)	0,051	0,264	1,288	0,014	0,003	0,124	0,032
	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	V
	0,222	0,039	0,007	0,018	0,028	0,026	0,033

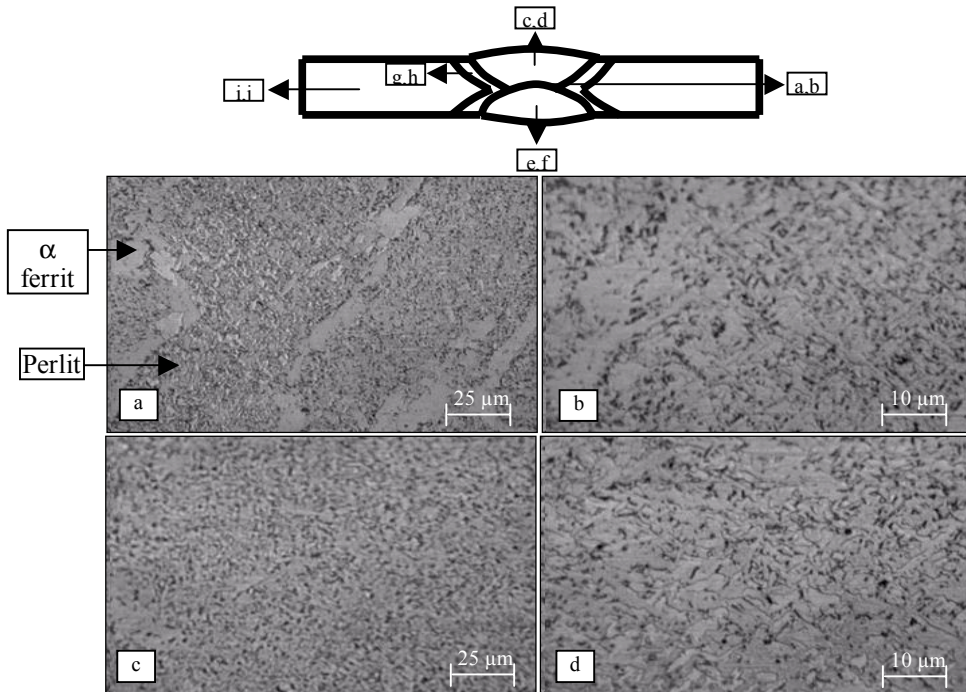
X65 malzemenin makroyapı fotoğrafı Resim 6.9’da verilmiştir.



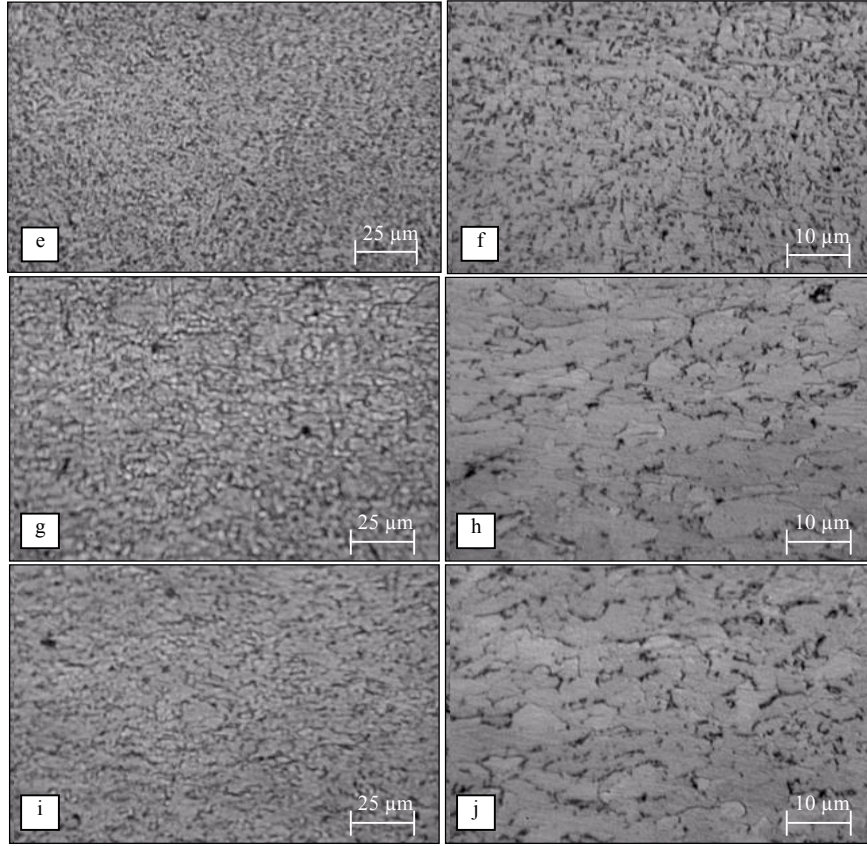
Resim 6.9. Kaynağın makro görüntüsü (X65, 11,91 mm)

Verilen makroyapı fotoğrafında nüfuziyetin tam olduğu ve birleşmemiş herhangi bir bölgenin olmadığı tespit edilmiş olup herhangi bir kaynak hatasının (yanma oluğu, çatlak, gözenek, kalıntı, v.b.) olmadığı görülmektedir. Birleştirme işleminde iç kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönlenmeler ana malzemeye ters yönde gerçekleşirken, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönlenmeler ana malzeme ve iç kaynağa ters yönde oluşmuştur. Ayrıca ana malzeme, ITAB ve kaynak metal bölge de belirgin bir şekilde görülebilmektedir.

Resim 6.10'da x400 ve x1000 büyütme olarak verilen mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında diğer malzemelerin mikroyapıları ile benzerlik arz ettiği görülmektedir. Burada da ITAB'da iri taneli bölgenin, kaynak metalinde ise ince taneli yapının olduğu tespit edilmiştir. İç ve dış kaynak metallere eş aksel bir yapının hakim olduğu, iç ve dış kaynağın birleşim bölgesinde ise tane yapısında belirgin bir şekilde plakalar halinde ferrit tanelerinin olduğu görülebilmektedir.



Resim 6.10. 11,91 mm kesit kalınlığındaki X65 numunesi mikroyapı fotoğrafları a,b) İç ve dış kaynak birleşim noktası (x400, x1000), c,d) Dış kaynak (x400, x1000),



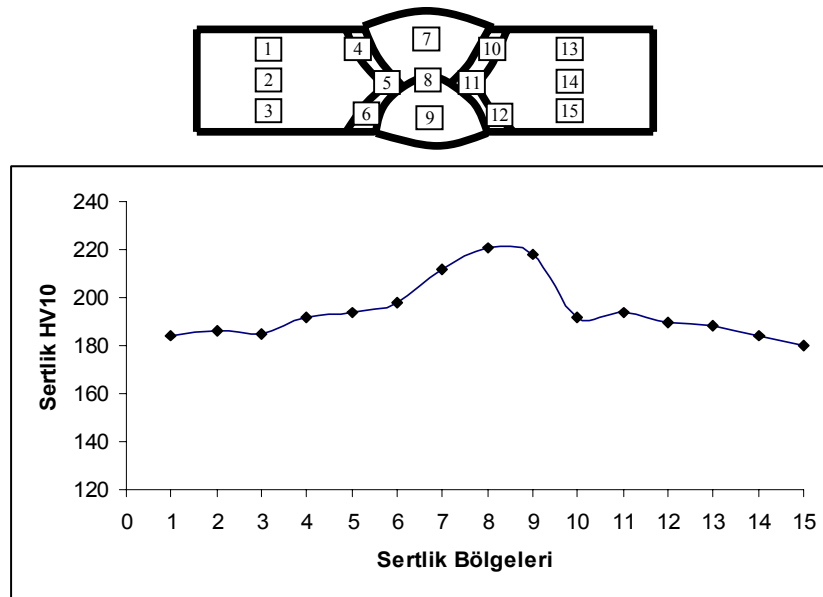
Resim 6.10. (Devam) 11,91 mm kesit kalınlığındaki X65 numunesi mikroyapı fotoğrafları e,f) İç kaynak (x400, x1000), (g,h)Isının tesiri altındaki bölge (ITAB) (x400, x1000), i,j)Ana malzeme (x400, x1000)

Çizelge 6.18’de X65 malzemesine ait çekme deney sonuçları verilmiştir. Verilen bu sonuçlar incelendiğinde ana malzemenin çekme mukavemetinin 564 N/mm^2 , kaynakla birleştirilmiş parçanın çekme mukavemetinin ise 615 N/mm^2 olduğu görülürken % uzama değerlerinin ise ana malzemede % 36, kaynaklı malzemede de % 14 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.18. X65 malzemeye ait çekme testi sonuçları (11,91 mm).

Malzeme	Max. Çekme Dayanımı $R_m \text{ (N/mm}^2\text{)}$	% Uzama
Ana malzeme	564	36
Kaynaklı malzeme	615	14

X65 malzemenin sertlik grafiği Şekil 6.5'te verilmiştir. Verilen sertlik grafiğinde en yüksek sertlik değerinin kaynak metalinde olduğu, en düşük sertlik değerinin ise kaynak metalinin yanında olduğu görülmektedir. Kaynak metali sertliğinin yaklaşık 220 HV olduğu, ana malzeme sertliğinin ise ilk sertlik değeri olan yaklaşık 190 HV değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5. Sertlik alınan bölgeler ve sertlik sonuç grafiği (X65, 11,91 mm).

X 65 malzemesine ait -20 °C'de gerçekleşen çentik - darbe deneyleri sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.19'da verilmiştir. Çentik - darbe deney sonuçlarına göre ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 299 Joule, kaynak metalinin ise 65 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.19. X65 malzemeye ait çentik - darbe deney sonuçları (11,91 mm).

Malzeme	Enerji(Joule)			
	Test sıcaklığı:-20°C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana malzeme	299	299	299	299
Kaynaklı bölge	63	71	61	65

Kaynakla birleştirilmiş parçalardan elde edilen numunelere uygulanan eğme işleminin sonuçları Çizelge 6.20’de verilmiştir.

Çizelge 6.20. X65 malzemeye ait eğme deneyi sonuçları (11,91 mm).

Mil Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dıştan içe		İçten dışa	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
112	139	180°	Hata yok	180°	Hata yok

6.1.6. API 5 L X65 petrol boru numunelerine ait deney sonuçları

Çizelge 5.5’de verilen kaynak parametrelerine uygun olarak birleştirme işlemi yapılan 1067 mm çapında, 14,27 mm kesit kalınlığında ve X65 kalitesindeki boruya ait mikroyapı ve mekanik test sonuçları aşağıda verilmiştir.

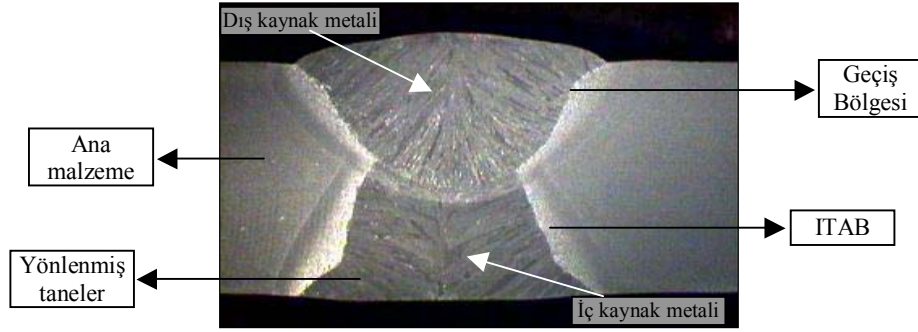
Çizelge 6.21’de verilen kaynaklı bölgenin kimyasal analiz sonucuna bakıldığında ana malzeme, ilave tel ve tozun ortalama değerlerinden oluşan bileşim görülmektedir.

Çizelge 6.21. API 5L X65 malzeme kaynak metalinin kimyasal analizi (14,27 mm).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Element (%)	0,054	0,261	1,373	0,015	0,004	0,155	0,031
	Mo	Cu	N	Al	Nb	Ti	V
	0,190	0,037	0,007	0,018	0,037	0,014	0,039

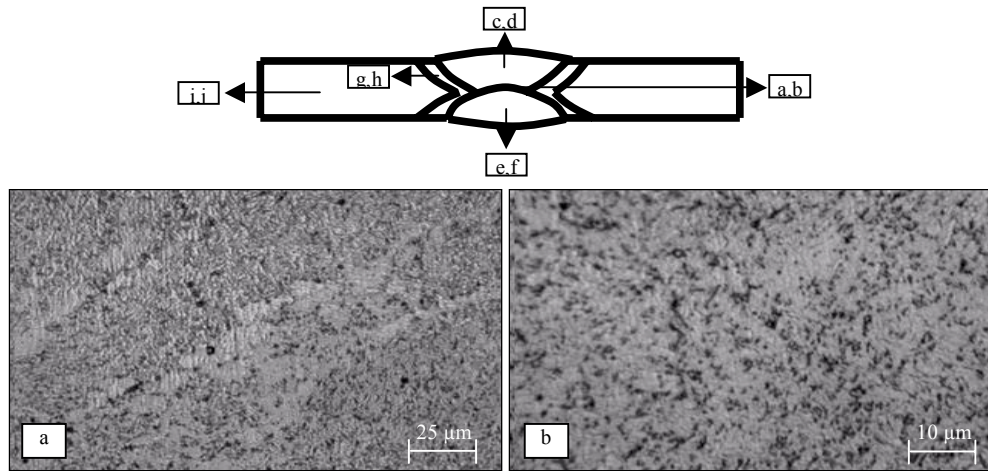
Resim 6.11’de verilen makroyapı fotoğrafına bakıldığında ana malzeme, ITAB, kaynak geçiş bölgesi ve kaynak metali bölgeleri belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca herhangi bir kaynak hatası olmadığı ve kaynak metali tanelerinin ısı akış yönüne ters olacak şekilde yönlendiği görülmektedir. Birleştirme işleminde iç

kaynak dış kaynaktan önce yapıldığından iç kaynaktaki yönlenmeler ana malzemeye ters yönde gerçekleşirken, daha sonra yapılan dış kaynaktaki yönlenmeler ana malzeme ve iç kaynağa ters yönde oluşmuştur.

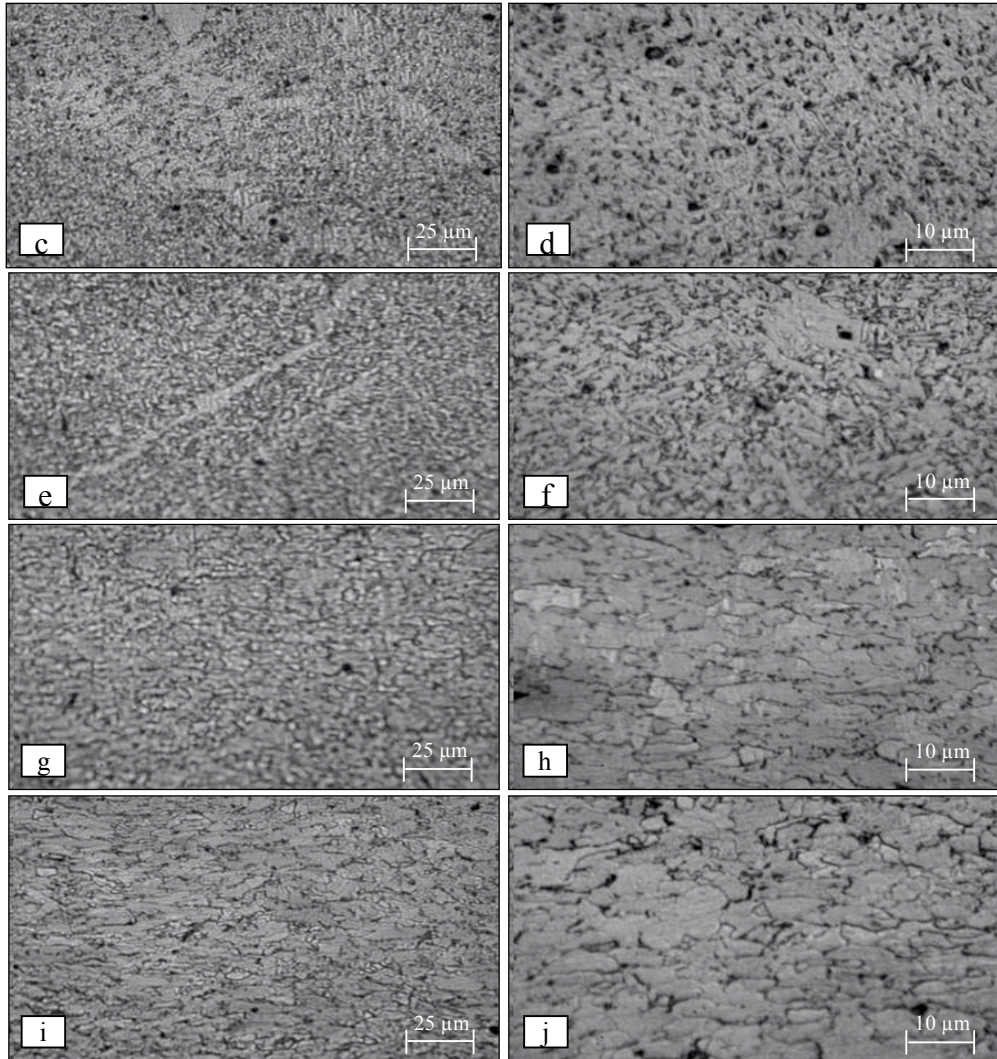


Resim 6.11. Kaynağın makro görüntüsü (X65, 14,27 mm).

x400 ve x1000 büyütme olarak ana malzeme, ITAB ve kaynak metal mikroyapı fotoğrafları Resim 6.12’de verilmiştir. Verilen mikroyapı fotoğraflarından ITAB da ana malzemeye oranla daha iri tanelerin oluştuğu, kaynak metalinde ise diğer bölgelere oranla çok daha homojen ve karmaşık şekilli tanelerin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, dış kaynak iç kaynaktan daha sonra yapıldığı için dış kaynaktaki kaynak metal tanelerinin ısının etkisiyle daha iri bir şekilde oluştuğu ve tanelerin ısı akış yönüne ters bir şekilde yönlendiği görülebilmektedir.



Resim 6.12. 14,27 mm kesit kalınlığındaki X65 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları a,b) İç ve dış kaynak birleşim noktası (x400, x1000).



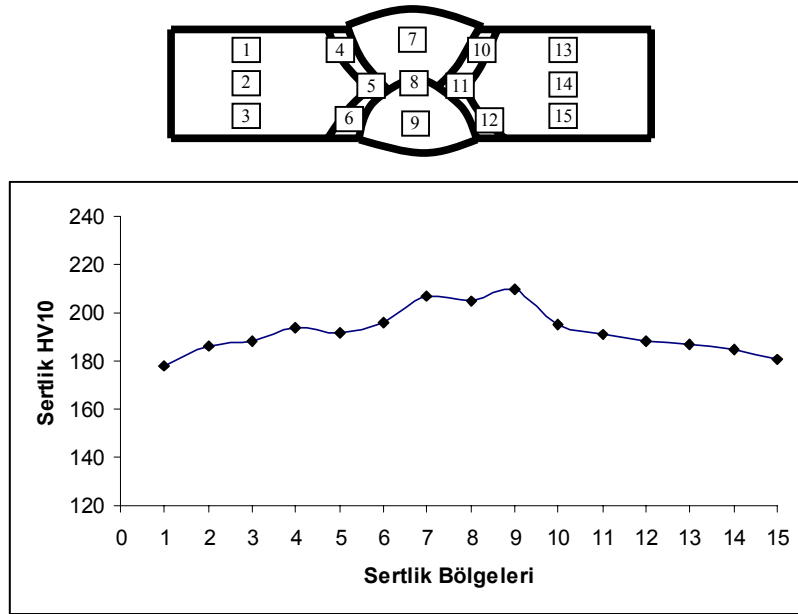
Resim 6.12. (Devam) 14,27 mm kesit kalınlığındaki X65 numunesinden alınan mikroyapı fotoğrafları c,d) Dış kaynak (x400, x1000), e,f) İç kaynak (x400, x1000), g,h) Isınım tesiri altındaki bölge (ITAB) (x400, x1000), i,j) Ana malzeme (x400, x1000)

Çizelge 6.22’de verilen X65 malzemesine ait çekme testi sonuçları incelendiğinde ana malzemenin çekme mukavemetinin 584 N/mm^2 , kaynakla birleştirilmiş parçanın çekme mukavemetinin ise 638 N/mm^2 olduğu görülürken % uzama değerlerinin ise ana malzemede % 42, kaynaklı malzemede % 21 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.22. X65 malzemeye ait çekme testi sonuçları (14,27 mm).

Malzeme	Max. Çekme Dayanımı Rm (N/mm ²)	% Uzama
Ana malzeme	584	42
Kaynaklı malzeme	638	21

Şekil 6.6'da verilen sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak bölgesinde olduğu, en düşük sertliğin kaynak metalinin yanında olduğu görülürken kaynak metalinin sertliğinin yaklaşık 210 HV olduğu, ana malzeme sertliğinin ise yaklaşık 185 HV olduğu görülmektedir.



Şekil 6.6. Sertlik sonuçları grafiği (X65, 14,27 mm).

Çizelge 6.23'de -20°C'de yapılan çentik - darbe deneyi sonucundan elde edilen değerler görülmektedir. Verilen bu değerler incelendiğinde ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 275 Joule, kaynak metalinin ise 151 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.23. X65 malzemeye ait çentik - darbe deney sonuçları (14,27 mm).

Malzeme	Enerji(Joule)			
	Test sıcaklığı:-20°C			
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama
Ana malzeme	272	275	278	275
Kaynaklı bölge	162	147	144	151

X65 malzemesine ait eğme deney numunelerinden elde edilen ve Çizelge 6.24’de verilen mil çapı ve eğme mesafesinde gerçekleştirilen sonuçlara bakıldığında kaynaklı bölgede göz ile yapılan incelemelerde herhangi bir çatlak, yırtık ve hataya rastlanmamıştır.

Çizelge 6.24. X65 malzemeye ait eğme deneyi sonuçları (14,27 mm).

Mil Çapı (mm)	Mesafe (mm)	Dıştan içe		İçten dışa	
		Açı	Sonuç	Açı	Sonuç
132	164	180°	Hata yok	180°	Hata yok

6.2. Deney Sonuçlarının Tartışılması

Petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanılan X65, X52, X70 ve X60 malzemelerine ait ve Bölüm 6.1’de deney sonuçları verilen bulgular bu bölümde ayrı ayrı tartışılacaktır.

6.2.1. Makroyapı sonuçlarının tartışılması

Bölüm 6.1’de Deney Sonuçları bölümünde verilen API 5L standardındaki X52, X60, X65 ve X70 malzemelerine ait makroyapı fotoğrafları incelendiğinde yapısal olarak genel bir benzerlik görülmektedir. Ancak Resim 6.3, Resim 6.7 ve Resim

6.10'da görülen sırasıyla X52, X70 ve X60 malzemelerinin makro görüntülerinde sütunsal tanelerin daha belirgin ve kaba olduğu, ITAB'ların daha geniş olduğu görülebilmektedir. Buna sebep olarak bu üç malzemenin kesit kalınlıklarının diğer malzemelerden daha ince olduğu düşünülmektedir. İnce olan malzemelerin kaynak işleminde yüksek ısı girdisi sebebiyle ITAB daha geniş bir alanda oluşmuş ve ana malzemenin ergime kapasitesi artmıştır. Bu sebeple diğerlerine nazaran bu üç ince kesitli malzemede yönlenme çizgileri ve ITAB'ın genişliği daha belirgin olmuş ve diğer üç malzemedan ayrılmıştır. Resim 6.1, Resim 6.13 ve Resim 6.16'da X65 malzemesine ait farklı kesit kalınlıklarında olan doğalgaz ve petrol borularının kaynak metali tanelerinin daha ince ve ITAB'ın daha dar olduğu görülmektedir. Burada, birleştirilen malzemelerin kesit kalınlıklarının diğer üç malzemedan daha fazla olması ITAB'ın daha dar bir alanda oluşmasına neden olmuş ve hızlı katılaşmadan dolayı ince taneli bir kaynak metalinin oluşmasına sebep olmuştur. Buradaki yapısal farklılığı etkileyen en önemli faktörün malzeme kesit kalınlığı sebebiyle oluşan bölgesel ısı girdisi olduğu düşünülmektedir. görülmektedir ki, ilerleyen aşamalarda incelenecek olan mikroyapı incelemeleri ve mekanik değerlerin sonuçlarının tartışmalarında bu durum daha açık bir şekilde görülecektir. Ayrıca incelenen makro fotoğrafların tümünde dış kaynak iç kaynaktan daha sonra gerçekleştiği için iç kaynak dış kaynağa ön tav işlemi uygulamaktadır. Bu ön tav etkisiyle dış kaynaklardaki kaynak metali alanı iç kaynaklara nazaran daha geniş olmaktadır. Bu da bütün makroyapı fotoğraflarında açıkça görülmektedir. Makroyapı fotoğraflarının tamamına genel olarak bakıldığında nüfuziyetin tam olduğu, aynı zamanda makro düzeyde hata diyebileceğimiz herhangi bir yapıya (yanma oluğu, gözenek, kalıntı, çatlak, v.b.) rastlanmadığı görülmüştür.

6.2.2. Mikroyapı sonuçlarının tartışılması

Mikroyapı fotoğrafları genel olarak incelendiğinde, ana malzemeye göre kaynaklı malzemelerde oluşması beklenen tipik ITAB tane yapısı oluşmuş, kaynak metalinde ise ince taneli yapıların oluştuğu görülebilmektedir.

Resim 6.10 ve Resim 6.17’de verilen X65 ana malzemesine ait farklı ebatlardaki petrol borularına ait mikroyapı fotoğrafları birbirine benzemekle birlikte Resim 6.2’de verilen X65 doğalgaz borusu kaynak metali mikroyapısı daha ince tanelerden oluşmaktadır. Diğerleri ise kısmen dendritik tanelerden oluşmuştur. Bu malzemelerin kaynak metali mikroyapı fotoğraflarında uzun sütunsal ferrit plakaları görülürken doğalgaz borusuna ait kaynak metalinde daha küçük ve sık ferrit plakaları görülmektedir. Bunun sebebinin, petrol boruları doğalgaz borularına göre daha kalın olduğundan kaynak esnasında aynı anda iç kaynakta 3, dış kaynakta ise 2 tel kullanılarak kaynaklandığından daha fazla ısı girdisine maruz kalmış dolayısıyla daha geç soğuma sebebiyle olduğu düşünülmektedir. Mikroyapı fotoğraflarında en iri ana malzeme tane yapısının Resim 6.4’de görülen X52 malzemesi iken, en küçük tane yapısının Resim 6.6’da görülen X70 malzemesine ait olduğu tespit edilmiştir. Bilindiği gibi ince taneli yapıların dayanımı kaba tanelere göre daha yüksektir. Çekme deneyi sonuçlarında da iri taneli yapıya sahip olan X52 malzemesinin çekme dayanımı en düşük değer çıkarken, ince taneli yapıya sahip X70 malzemesine uygulanan çekme deneyi sonucu en yüksek değerdedir. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri birbirine yakın olmakla birlikte üretim esnasında tane inceltimesi yapılarak malzemelerin dayanımı arttırılmaktadır. Diğer mekanik testlerde bu durumu doğrulamaktadır. Mikroyapı fotoğraflarında özellikle aynı anda birden fazla tel kullanılarak yapılan malzemelerin kaynak metalinde sütunsal uzun ferrit plakalarının varlığı görülmektedir. Malzemeleri kaynaklama esnasında tel sayısı arttıkça ısı girdisi miktarı artmakta dolayısıyla soğuma süresi uzamaktadır. Bu da ferrit plakalarının oluşumuna imkân vermektedir.

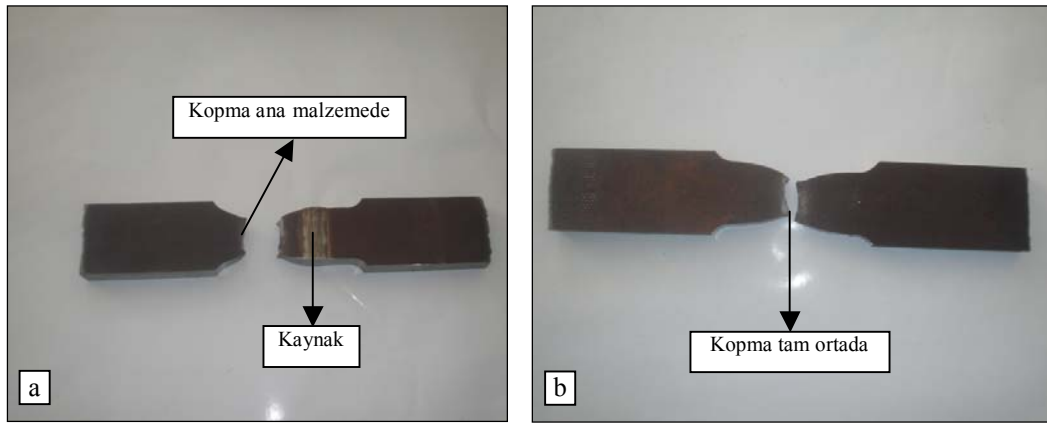
6.2.3. Çekme deney sonuçlarının tartışılması

Çekme deney sonuçları incelendiğinde kopmanın bütün malzemelerde ana malzemedan olduğu, kaynaklı bölgeden kopmanın olmadığı tespit edilmiştir. Resim 6.13’de çekme numunelerinin kopma bölgeleri görülmektedir. Resim 6.13.a’daki resimden görüleceği üzere kaynaklı malzemede kopma ana malzemedan, Resim 6.13.b’deki resimde ana malzemedan alınan çekme numunesinde ise kopma

malzemenin tam ortasından gerçekleşmiştir. Bu da kaynaklı numunenin çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımından yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin deformasyonu engellemesi olarak düşünülebilir. Literatürde, aynı bileşim ve farklı çekme boylarında yapılan çekme testleri sonucu, eğer çekme hızı sabit ise çekme boyu kısa olan malzemenin hızlı pekleşmeden dolayı daha yüksek dayanım gösterdiği belirtilmektedir [Kahraman ve diğ., 2005]. Çalışmamızda çekme numuneleri standarda (ASTM E8) uygun hazırlandığından, kaynaklı numunelerdeki kaynak bölgesinin sert olması nedeniyle deformasyon bu bölgelerin dışında meydana gelmektedir. Deformasyonun dar bir bölgede meydana gelmesi ise dayanımın yüksek değerler göstermesine neden olmuştur. Kopma ana malzemeden olmasına rağmen, kaynaklı numunenin % uzama değerlerinin düşük çıkmasının sebebi ise kaynaklı bölgenin çekme testi sırasında deformasyona uğramamasına bağlanmıştır. Kaynaklı bölgenin deformasyona karşı göstermiş olduğu direnç çekme mukavemetinin artmasına ve % uzama değerinin azalmasına neden olmaktadır.

Çekme test sonuçlarında hem ana malzemenin hem de kaynak metalinin en yüksek çekme değerinin Çizelge 6.10'da verilen X70 malzemesinde olduğu görülmektedir. X70 malzemesinden ölçülen çekme değerleri kaynak metalinde 713 N/mm^2 , ana malzemede ise 653 N/mm^2 'dir. En düşük çekme mukavemeti değerleri ise X52 malzemesinde görülmektedir. Bu malzemenin çekme mukavemeti değerleri ana malzemede 515 N/mm^2 , kaynak metalinde 557 N/mm^2 'dir. Mekanik testlerde elde edilen sonuç farklılıklarında malzemelerin tane boyutlarının önemli ölçüde etkili olduğu görülmektedir. Tane boyutu, mukavemeti belirleyen bir mekanizma olup, tane boyutu ile mukavemet arasında ters orantı vardır. Tane boyutu arttığında mukavemet azalır, tane boyutu azaldığında ise mukavemetin arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Çeliklerde tane küçülmesinin mukavemet artırıcı mekanizmalardan bir tanesi olduğu bilinmektedir. Malzemelerin tamamının mikroyapı sonuçlarına bakıldığında da en ince tane yapısına sahip malzemenin X70 malzemesi olması çekme dayanımının bu malzemede yüksek çıkmasına neden olmuştur. En düşük

çekme dayanımı gösteren X52 malzemesinin mikroyapı fotoğraflarında ise bu malzemenin en kaba taneli yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Resim 6.13. Ana malzemeden ve kaynaklı bölgeden alınmış çekme deneyi sonuçları

6.2.4. Sertlik deney sonuçlarının tartışılması

Sertlik sonuçları grafiklerine genel olarak bakıldığında, en yüksek sertliğin kaynak metalinde, en düşük sertliğin ise ana malzemede olduğu görülmektedir. Çelik malzemelerde karbonun sertleşebilirliği arttırdığı bilinen bir durumdur. Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de kullanılan malzeme ve telin kimyasal analizine bakıldığında; kullanılan telin karbon oranının ana malzemelerden yüksek olduğu görülmektedir. Bu da sertlik deney numunelerinin tümünde kaynak metalinin sertliğinin yüksek çıkmasına sebep olmaktadır.

Malzemelerin 15 farklı noktasından alınan sertlik değerleri içerisinde ana malzemenin en yüksek sertlik değerinin Şekil 6.3’de grafiği verilen yaklaşık 190 HV ile X70 malzemesi iken en yüksek kaynak metal sertliği Şekil 6.5’de görülen yaklaşık 220 HV sertlik değeri ile X65 petrol borusunda olduğu tespit edilmiştir. Kaynak metal sertliği en yüksek diğer malzeme ise X65 malzemesinden sonra yine X70 malzemesindedir. En ince tane yapısına sahip X70 malzemesinin en yüksek sertlik değerine sahip olması beklenirken X65 malzemesinin kaynak metalinin sertliğinin yüksek çıkması kaynak metal bileşimi ile ilgilidir. Bilindiği üzere

kaynak metalinin bileşimi ana malzeme ve ilave metalin bileşiminden mevcuttur. 11,91 mm kesit kalınlığına sahip X65 petrol borusunun kaynaklı birleştirme işleminde S3Mo tel kullanılmış, diğer malzemelerin kaynaklı birleştirmelerinde ise S2Mo tel kullanılmıştır. S3Mo kaynak telinin kimyasal kompozisyonuna bakıldığında Mn oranı S2Mo teline nazaran bariz bir şekilde yüksektir (Mn oranı S3Mo için %1,65, S2Mo için %1,03'tür). Bu yüksek Mn oranı kaynak metalinin sertliğini de arttırmıştır. Kaynak metali içerisinde serbest haldeki mangan karbonla birleşerek Mn_3C oluşturmuş dolayısıyla kaynak metalinin sertliği yükselmiştir.

İncelenen altı farklı malzeme için verilen sertlik sonuçlarında ana malzemeler içerisinde en düşük sertlik değeri yaklaşık 160 HV ile X52 malzemesindedir. Bu sertlik değerini X60 malzemesi takip etmektedir. Kaynak metali sertlik değerlerine bakıldığında ise en düşük değer yaklaşık 180 HV ile X60 malzemesinde olduğu görülmektedir. Kaynak metali sertlik ölçümlerinde mikroyapı incelemelerinde görülen en iri tane yapısına sahip X52 malzemesinin sertliğinin daha düşük çıkması beklenirken X60 malzemesinin sertliğinin daha düşük çıkması yine malzemelerin kimyasal kompozisyonu ile ilgilidir. X52 malzemesinin karbon yüzdesinin (%0,09) cüzi bir miktarda olsa X60 malzemesinden (%0,083) yüksek olması iri tane yapısına rağmen X52 malzemede sertlik miktarının yüksek çıkmasına sebep olan bir etken olmuştur. Ayrıca malzemelerin Ti oranları da sertlik değerlerini etkileyen başka bir etken olarak düşünülebilir. X52 malzemesinin Ti oranı % 0,001 iken, X60 malzemesinin Ti oranı % 0,020'dir. Titanyumun, sertliği ve kırılgenliği artırıcı yönde etkili elementler grubundaki oksijen ile TiO ve azot ile TiN bileşimini oluşturması kaynak metalindeki sertlik değerlerinin düşmesine neden olur. Ti oranı fazla olan X60 malzemede bu durum X52 malzemeye oranla daha yoğun olacağından X60 malzemesinin sertlik değeri daha düşük bir değerdir.

Çekme deneyi sonuçlarına bakıldığında da kopmaların ana malzemeden oldukları görülmüştür. Kaynak metali sertliğinin yüksek çıkması, dolayısıyla çekme anında deformasyona uğramaması nedeniyle kopmalar Resim 6.13'de görüleceği üzere, düşük sertlik değerine sahip olan ana malzemelerden gerçekleşmiştir.

6.2.5. Çentik - darbe deney sonuçlarının tartışılması

-20 °C’de yapılan çentik – darbe deneylerinde, kaynaklı bölgelerdeki çentik - darbe değerlerinin daha düşük olduğu, ana malzeme değerlerinin ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Sertlik deney sonuçlarında da en sert bölgenin kaynak metali olduğu tartışılmıştı.

Elde edilen çentik - darbe deney sonuçları sertlik sonuçları ile kıyaslandığında sertliğin yüksek olduğu kaynaklı bölgelerin kırılabilirliğinin daha yüksek olduğu buna karşın ana malzemelerin kaynak bölgelerine oranla daha tok olduğu ve kırılma enerjisini absorbe ettiği düşünülmektedir. Sertlik deneylerinden elde edilen verilerden de görüleceği üzere kaynak bölgesi malzemenin en sert bölgesidir. Kaynak metalleri için ölçülen sertlik grafiklerinde verilen değerler ile tokluk değerleri kıyaslanacak olursa; sertlik arttığında tokluğun azaldığı görülmektedir.

Çentik - darbe deney sonuçları incelendiğinde, numuneler içerisinde Çizelge 6.19’da verilen 11,9 mm kesit kalınlığındaki X65 malzemesinin ana malzeme ortalama çentik - darbe değeri 299 Joule ile en yüksek değerdir. X70 malzemenin en ince tane yapısına sahip olmasına rağmen X65 malzemenin en yüksek çentik - darbe değeri göstermesinin sebebi malzemelerin kimyasal kompozisyonu ile ilgilidir. Deneylerde kullanılan malzemelere ait olan ve Çizelge 5.1’de verilen kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında petrol borusu üretiminde kullanılan malzemelerin %C oranının doğalgaz boru üretiminde kullanılan malzemelerin %C oranının yaklaşık yarısı olduğu açıkça görülmektedir. Karbon miktarı artışı malzeme sertliğini arttırıcı mekanizmaların en önemlilerinden biridir. Karbon miktarı arttıkça sertlik ve mukavemet artarken malzemenin tokluğu düşer. Bu nedenledir ki; deneylerin tümünde malzeme tokluğunun en yüksek tokluk değerini gösterdiği malzemeler, %C miktarının en düşük olduğu petrol boru imalatında kullanılan X65 malzemelerdir. Bu malzemelerden 11,91 mm kesit kalınlığındaki numunelerin ortalama çentik - darbe değeri 299 Joule, 14,27 mm kesit kalınlığındaki malzemenin ortalama çentik - darbe değeri ise 275 Joule dir. %C

miktarları hemen hemen aynı oranda olan bu iki malzemenin farklı tokluk değerleri göstermesi malzemelerdeki Mn oranı ile ilgilidir. 11,91 mm kesit kalınlıklı malzemenin Mn oranının (%1,1) 14,27 mm malzemenin Mn oranından (%1,35) daha düşük olması bu malzemenin daha düşük tokluk değerlerine sahip olmasını sağlamıştır. Sertlik deney sonuçları tartışmalarında da malzemelerdeki Mn oranının artmasıyla malzemenin mukavemet ve sertlik özelliklerinin arttığından bahsedilmiştir.

Ana malzemedede en düşük tokluk değeri gösteren malzeme 142 Joule ile X60 malzemedir. İkinci en düşük malzeme ise 182 Joule ile X52 malzemesidir. Mikroyapı fotoğraflarından da görüleceği üzere en iri tane yapısına sahip malzemelerin X52 ve X60 malzeme oldukları görülmektedir. Dolayısıyla çentik - darbe değerlerinde de en düşük değerleri bu malzemeler göstermektedir. Fakat en iri tane yapısına sahip X52 malzemenin en düşük tokluk değerlerini göstermesi gerekirken X60 malzemenin en düşük tokluk değeri göstermesi yine Mn oranı ile ilgilidir. X60 malzemenin Mn oranının (%1,45), X52 malzemenin Mn oranından (%0,93) bariz bir şekilde yüksek olması bu malzemenin daha düşük tokluk değeri göstermesine sebep olmuştur.

Kaynak metali içinde en düşük tokluk değerinin ise yine 11,91 mm kesit kalınlığına sahip petrol boru üretiminde kullanılan X65 malzemedede olduğu görülmüştür. Bu malzemenin en düşük çentik - darbe değerini göstermesinin sebebi ilave metal olarak kullanılan S3Mo kaynak telidir. Sertlik sonuçlarında tartışıldığı üzere S3Mo ilave telinde bulunan Mn oranının yüksek olması kaynak metali sertliğini arttırdığı gibi tokluğu düşürmektedir. Kaynak metali içinde en yüksek tokluk değeri gösteren malzeme 151 Joule ile 14,27 mm kesit kalınlığındaki petrol boru numunesidir. Bu malzemenin en yüksek değeri sergilemesi yine malzemenin kimyasal kompozisyonu ile ilgilidir. %C miktarı ve Mn miktarı yaklaşık olarak en düşük oranlara sahip bu malzeme S2Mo tel ile birleştirildiğinden ve kaynak metalinde oluşan ferrit plakalarının varlığı nedeniyle en yüksek tokluk değerini sergilediği düşünülmektedir.

6.2.6. Eğme deney sonuçlarının tartışılması

Eğme deneyi kaynaklı malzemelerde makro olarak bir hatanın oluşup oluşmadığını görmek için yapılan bir deneydir. Bütün malzemelere 180° olarak uygulanan eğme deneylerinde malzemelerde çatlama, yırtılma gibi herhangi bir hatanın oluşmadığı görülmüştür. Bu da malzemelerin birleştirmesinin uygun bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Resim 6.14’de eğme deneyi sonucunda numunelerin iki farklı açıdan görünüşü verilmiştir.



Resim 6.14. Eğme deneyi sonucunda numunelerin iki farklı açıdan görünüşü

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışma sonunda elde edilen genel sonuçlar ise;

- İnce taneli yapıların malzemelerin mekanik özelliklerini arttırdığı, ayrıca parçanın kesit kalınlığının ITAB bölgesini doğrudan etkilediği dolayısıyla ince parçalarda ısı yayılımının daha geniş bir alana yayıldığı,
- Kaynak metalinin sertliğinin yüksek olmasının çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin deformasyona uğramasını engellediği, bu nedenle kopmanın ana malzemede gerçekleştiği,
- Tozaltı kaynağında, ilave tel bileşiminin kaynak metali sertliğini doğrudan etkilediği, S3Mo tel kullanılarak yapılan birleştirmenin, S2Mo tel kullanılarak yapılan birleştirmelere kıyasla kaynak metalinde daha sert bir yapı oluşturduğu,
- Kaynak metaline ilave edilen Mn'nın kaynak metali sertliğini önemli oranda arttırdığı, buna karşılık Ti ilavesinin kaynak metali sertliğini düşürdüğü, buna karşın tokluğunu ise arttırdığı,
- API 5L standardındaki X52, X60, X65 ve X70 malzemelerin petrol ve doğalgaz iletim hatlarında kullanımı için -20 °C'deki çalışma şartlarına uygun olduğu,
- X70 malzemenin daha ince taneli yapıya sahip olduğu bu yüzden dayanım özelliklerinin, diğer malzemelere oranla yüksek basınç altında, daha düşük kesit kalınlık ve çapta ihtiyaçlara aynı şekilde cevap verebilme özelliği nedeniyle daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

8.2. Öneriler

- Farklı ilave metaller ve tozlar kullanılarak kaynak metali üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Farklı kaynak ağzı geometrilerine sahip numunelerin mekanik / mikroyapı özellikleri incelenebilir.
- Boru hatlarının korozyon dirençleri üzerine çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Anık, S., Tülbentçi, K., “Ark Kaynakçısının El Kitabı”, **Gedik Holding Yayını**, İstanbul, 59-73 (1989).
2. Anık, S., Tülbentçi, K., Kaluç, E., “Örtülü Elektrot ile Elektrik Ark Kaynağı”, **Gedik Holding Yayını**, İstanbul, 285-291 (1991).
3. ASM Handbook Committe, “Welding, brazing and soldering”, **Metals Handbook**, U.S.A., 115–152, (1983).
4. Brensing, K.H., Summer, B., “Steel Tube and Pipe Manufacturing Processes”, **Europipe**, Germany , 53-67 (1998).
5. Chandel, R.S., Seow, H.P., Cheong, F.L., “ Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds”, **Journal of Materials Processing Technology**, 72:124 - 128 (1997).
6. Graf, M., Niederhoff, K., “Toughness Behaviour of the Heat Affected Zone (HAZ) in Double Submerged Arc Welded Large Diameter Pipe”, **Mannesmann Röhrenwerke A.G.**, Germany, 1-15 (2000).
7. Gülbahar, B., Akay, S., “Hafif alaşımlı çeliklerin ark kaynağında ısı çevrimlerin bilgisayar yardımı ile hesaplanması”, **II. Ulusal Kaynak Sempozyumu**, Ankara, 197 (1989).
8. Hulka, K., Heisterkamp, F., Gray, J.M., “Metallurgical concept and full scale testing of high toughness H₂S resistant 0,03 %C - 0,10 %Nb steel, CBMM, **Niobium Technical Report**, Brasil, 1-19 (2001).
9. Kahraman, N., Gülenç, B., Durgutlu, A., “Tozaltı ark kaynağı ile kaynaklanan düşük karbonlu çeliklerde serbest tel uzunluğunun mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisinin araştırılması”, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 18 (3): 473-480 (2005).
10. Karadeniz, S. , Günay, H., “Kaynak makinalarındaki son gelişmeler ve kaynak kalitesine etkileri”, **II. Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi**, Ankara, 133 (1999).
11. Mannesmann Röhrenwerke, “The Manufacture and Testing of Steel Pipe and Tubing”, **Europipe**, Dusseldorf , 53 -67 (1986).
12. Oğuz, B., “Ark Kaynağı El Kitabı”, **Oerlikon Yayını**, İstanbul, 1-12 (1975)

13. Peters, P.A., Frackmann, H.G., Christmann, H., Wiesche, W., “The manufacture of spiral welded pipe with integrating quality assurance”, Metals Society Conference, *Manufacture, fabrication and operation of pipelines*, Glasgow, 148-162 (1982).
14. Petrogas, “Dünya daha çok enerji istiyor”, *Petrogas, Botaş Vakfı Yayın Organı Sayı 10*, Ankara, 30-31 (1999).
15. Sugitani, Y., “Intelligent Arc Welding Robot with Simultaneous Control of Penetration Depth and Bead Height”, *Tube International* , 4:93–99 (1990).
16. Şirin, K., “Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral boru üretiminde kaynak parametrelerinin kaynak dikiş kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 9-97, (2004).
17. Şirin, K., “Yüksek frekans indüksiyon kaynaklı boru üretiminde proses parametrelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri” , Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-15, (1997).
18. Şirin, M.Ş., “ Ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile boru imalinde kaynak parametreleri dikiş formu ve ITAB arasındaki ilişkinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2-67 (2001)
19. Tekin, A, “Çelik ve ısıtma işlem”, Bofors El Kitabı, *Hakan Ofset*, İstanbul, 111 (1984).
20. Tusek, J., “Mathematical modelling of melting rate in twin-wire welding”, *Journal of Material Processing Technology*, 100:250-256 (1999).
21. Tülbentçi, K., Kaluç, E., “Kaynak teknolojisinde yeni nesil akım üreteçleri: İnverterler”, *I. Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi*, Ankara, 93-102 (1997a).
22. Tülbentçi, K., Kaluç, E., Sarı, N.Y., “Mig-Mag eriyen elektrot ile gazaltı kaynak yöntemi seminer notları”, *Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi Araştırma Eğitim ve Uygulama Merkezi*, Kocaeli, 18 – 29, (1997b)
23. Tülbentçi, K., “Gazaltı Kaynak Yöntemi Mig-Mag”, *Archtech*, İstanbul, 35-63, (1998).
24. Tülbentçi, K., Kaluç, E., “İnce taneli yapı çeliklerinin kaynak edilebilirliği”, *III. Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi, Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 175-185, (2001).

25. Yıldız, M., “Doğalgaz boru hatlarının kaynağı ve tahribatsız muayenesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4-12, (2000).
26. Yung, K.C., Ralph, B., Lee, W.B., Fenn, R., “Investigation into welding parameters affecting the tensile properties of titanium welds”, *Journal of Material Processing Technology*, 63:1-3 (1997).
27. Weisweiller, F.J., Sergeev, G.N., “Nondestructive testing of large diameter pipe for oil and gaz transmission lines”, *VCH Pub*, 31-64 (1988) .

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ADA, Hakan
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 16.01.1980 - Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 297 30 72
 Faks : 0 (312) 266 06 16
 e-mail : ada_hakan@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniv./ Metal Eğt. Böl.	2003
Lise	M. Kemal Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2006	BOTAŞ Genel Müd.	Doğalgaz Boru Hatları Boru Temin İşleri Takip ve Kontrol

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Futbol, müzik, seyahat, bilgisayar teknolojileri.