

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FREKANS KONDÜKSİYON ELEKTRİK  
DİRENÇ KAYNAKLI ÇELİK BORU ÜRETİMİNDE  
KAYNAK PARAMETRELERİ İLE HATA OLUŞUM  
İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Mak.Müh. Fevzi Erkut ASLANOĞLU

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**106420**

106420

Tez Danışmanı : Prof. Nurullah GÜLTEKİN

*Prof. Nurullah Gültekin*

Prof. Dr. Ahmet Topuz *Ahmet*

Doç. Dr. Selahattin YUMURTAÇI *Selahattin Yumurtacı*

**TEC. YÜKSEK LİSANS MERKEZİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İSTANBUL, 2001

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	ii
KISALTIMA LİSTESİ.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	2
3. YÜKSEK FREKANS KONDÜKSİYON ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAKLI ÇELİK BORU İMALATINA GİRİŞ.....	3
3.1 Diğer Dikişli Çelik Boru Üretim Yöntemleri.....	3
3.1.1 Spiral Kaynak Yöntemi.....	3
3.1.2 Genişletilmiş Elektrik Füzyon Yöntemi.....	4
3.1.3 Sürekli Alın Kaynağı Yöntemi.....	6
3.1.4 Elektrik Direnç Kaynağı Yöntemi.....	7
3.1.5 Yüksek Frekans İndüksiyon Elektrik Direnç Kaynağı Yöntemi.....	8
3.2 Yüksek Frekans Kondüksiyon Elektrik Direnç Kaynaklı Çelik Boru İmalatına Giriş.....	9
3.2.1 Yüksek Frekans Tekniğinin Düşük Frekansa Göre Avantajları.....	10
3.2.2 Kondüksiyon İle İndüksiyon Arasındaki Farklar.....	12
3.2.2.1 Kondüksiyon Yönteminin Avantajları.....	12
3.2.2.2 İndüksiyon Yönteminin Avantajları.....	12
3.2.2.3 İndüksiyon ve Kondüksiyon Seçim Kriterleri.....	13
4. YÜKSEK FREKANS KONDÜKSİYON ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAKLI ÇELİK BORU ÜRETİMİ VE KALİTE KONTROL AŞAMALARI.....	14
4.1 Çelik Rulo Bant.....	15
4.1.1 Çelik Ergitme Yöntemleri.....	17
4.1.2 Çelik Döküm Yöntemleri.....	17
4.1.3 Çelik Haddeme Yöntemleri.....	17
4.2 Bant Dilme.....	19
4.3 Bant Açma.....	21
4.3.1 Hatta Kenar Dilme.....	22
4.4 Boru Formunun Verilmesi.....	23
4.4.1 Ön Bükme.....	24
4.4.2 Kafesleme.....	24
4.4.3 Finpas.....	25
4.5 Kaynak.....	25
4.5.1 Temel Kavramlar ve Birleşmenin Analizi.....	25
4.5.2 Yüksek Frekans Akımının Oluşturulması ve Kontrolü.....	28

4.5.3	Kaynak Akımının İletilmesi.....	32
4.5.3.1	Kaynak Boğazının Kaynak Noktasına Olan Mesafesi.....	33
4.5.3.2	Bant Kenarlarının Durumu.....	33
4.5.3.3	Dikiş Kılavuzu.....	35
4.5.3.4	Kaynak Kontakları.....	36
4.5.3.4.1	Kontakt Uç Dizaynı.....	37
4.5.3.4.2	Kontaktların Boruya Teması.....	38
4.5.3.4.3	Kontakt Temas Noktası İle Kaynak Merdaneleri Merkez Eksenine Arasındaki Mesafenin Belirlenmesi.....	38
4.5.3.4.4	Uç Eğim Açısı.....	39
4.5.3.5	Yüksek Frekans Akımının İzlediği Elektriksel Yollar.....	40
4.5.4	Empederler.....	41
4.6	İç Kazıma.....	42
4.7	Dış Kazıma.....	44
4.8	Tavlama.....	46
4.8.1	Sistem Elemanları.....	49
4.8.2	Güç Gereksinimi.....	49
4.8.3	Frekans Seçimi.....	50
4.8.4	İndüktör Tasarımı.....	52
4.9	Serbest Soğuma.....	53
4.10	Hat Soğutma Sıvısı İle Soğutma.....	54
4.11	Kalibrasyon.....	54
4.12	Eddy Akımları İle Muayene.....	54
4.13	Uçar Makas.....	55
4.14	Boy Kesme.....	55
4.15	Yassıltma Testi.....	55
4.16	Doğrultma.....	56
4.17	Kaynak Ağız Açılması.....	57
4.18	Boru İç Yıkama.....	57
4.19	Dış Taşlama.....	57
4.20	İç Taşlama.....	57
4.21	Hidrotest.....	58
4.22	Genel Kontrol.....	58
4.23	Ultrasonik Kontrol.....	58
5.	<b>YÜKSEK FREKANS KONDÜKSİYON ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAKLI ÇELİK BORU ÜRETİMİNDEKİ ELEKTRİKSEL VE METALURJİK OLAYLAR.....</b>	<b>60</b>
5.1	Elektriksel Olaylar.....	60
5.1.1	Kaynak Frekansının Etkileri.....	60
5.1.1.1	Matematiksel Yaklaşım.....	60
5.1.1.2	Deneysel Çalışmalar.....	64
5.2	Metalurjik Olaylar.....	73
5.2.1	Kaynak Bölgesindeki Metalurjik Reaksiyonlar.....	74
5.2.1.1	Seçici Oksidasyon.....	78
5.2.1.2	Beyaz Kaynak Hattı.....	79
5.2.3	Sıvı Metal Püskürmesi.....	80

6.	YÜKSEK FREKANS KONDÜKSİYON ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAKLI ÇELİK BORU ÜRETİMİNDE KARŞILAŞILAN YAYGIN KAYNAK HATALARI.....	84
6.1	Yaygın Kaynak Hataları.....	84
6.1.1	Noktalama.....	84
6.1.2	Kaynak Dikiş Bölgesinde Martenzitik Yapı Oluşumu.....	85
6.1.3	Porozite.....	87
6.1.4	Kanca Çatlaklar.....	88
6.1.5	Kaynak Dikişinde Tam Nüfuziyetsizlik (Açık Dikiş).....	90
6.1.6	Kaynak Dikişinde Metal Oksit Sıkışması.....	90
6.1.7	Ark Atlaması.....	92
6.2	Diğer Deneysel Çalışmalar ve Gözlemler.....	93
7.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	95
	KAYNAKLAR.....	97
	EKLER .....	99
	Ek 1 Metalurjik İnceleme Ø 168,3 x 4,37 Gr-B ( Kılcal Çatlak ).....	99
	Ek 2 Metalurjik İnceleme Ø 406,4 x 10.30 X-52 ( Yetersiz Normalizasyon).....	100
	ÖZGEÇMİŞ.....	101

## SİMGE LİSTESİ

$A_i$	İndüktör kesit alanı
$C$	Özgül ısı
$C_p$	Malzeme ısı kapasitesi
$D$	Boru et kalınlığı
$D_d$	Boru dış çapı
$D_i$	Boru iç çapı
$f$	Kaynak generatör frekansı
$f_i$	İndüktör çalışma frekansı
$f_1$	Şebeke frekansı
$f_{kritik}$	Kritik frekans
$g_i$	İndüktör genişliği
$h_0$	ITAB genişliği
$I_v$	Kaynak üçgeni içerisindeki faydalı akım
$I_{b1}$	Boru etrafındaki faydasız akım
$I_{b2}$	Hat veya izole edilmemiş kılavuz arasındaki faydasız akım
$I_K$	Kaynak akımı
$J$	Borudaki elektriksel akım yoğunluğu
$k$	Malzeme ısı geçirgenliği
$L_b$	Dilinmiş bant genişliği
$L_i$	İndüktör boyu
$M_{BORU}$	Boru birim ağırlığı
$M_{ITAB}$	ITAB birim ağırlığı
$M_Q$	<i>Birim saate tavlanan kütle</i>
$n$	Kontakt - Kenar taşma mesafesi
$p$	Kaynak üçgeni tepe açısı
$P_0$	Borunun kaynak edilebilmesi için kaynak üçgeninde ihtiyaç duyulan güç
$P_e$	Normalizasyon efektif gücü
$P_ç$	Normalizasyonda inverter çıkış gücü
$q$	Malzemede oluşturulan ısı
$t$	Boru malzemesi et kalınlığı
$T$	Borudaki sıcaklık dağılımı
$T_1$	Normalizasyon giriş sıcaklığı
$T_2$	Normalizasyon çıkış sıcaklığı
$\Delta T$	Malzemeyi kaynak edebilmek için binmedeki sıcaklık artışı
$V_0$	Kaynak veya hat hızı
$y_0$	Kaynak üçgeni yüksekliği
$z$	Nüfuziyet derinliği
$x$	Noktalamada hata aralığı
$\varepsilon$	Malzeme ısı difüzyonu
$\rho$	Malzeme yoğunluğu
$\Omega$	Özgül direnç
$\mu$	Malzeme manyetik geçirgenliği
$\mu_r$	Özgül geçirgenlik
$\sigma$	Malzeme elektriksel iletkenliği
$\delta$	Isıl referans derinliği
$\chi$	Elektriksel referans derinliği
$\xi$	Verim

## KISALTMA LİSTESİ

API	American Petroleum Institute
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
HMK	Hacim Merkezli Kübik
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
LC	Liquid Cristal
NDT	Non-Destructive Testing
PLC	Programmable Logic Controller
TS	Türk Standartları
YMK	Yüzey Merkezli Kübik



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1	Spiral kaynaklı çelik boru imalatı prensip resmi..... 3
Şekil 3.2	Spiral kaynaklı çelik boru imalatı..... 4
Şekil 3.3	Genişletilmiş füzyon yöntemi prensip resmi..... 4
Şekil 3.4	Hidrolik şişirme uygulaması..... 5
Şekil 3.5	Sürekli alın kaynağı prensip resmi..... 6
Şekil 3.6	Sürekli alın kaynağı prosesi..... 6
Şekil 3.7	Elektrik direnç kaynağı prensip resmi..... 7
Şekil 3.8	Elektrik direnç kaynaklı çelik boru üretim prosesi..... 8
Şekil 3.9	İndüksiyon kaynağı prensip resmi..... 9
Şekil 3.10	Kondüksiyon kaynağı prensip resmi..... 10
Şekil 4.1	Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı çelik boru imalatında iş akışı..... 14
Şekil 4.2	Sıcak haddelenmiş çelik bantlar..... 16
Şekil 4.3	Sürekli haddeleme..... 18
Şekil 4.4	Çevirme haddeleme..... 18
Şekil 4.5	Hadde ayarındaki hatalardan dolayı oluşan et kalınlığı sapmaları..... 18
Şekil 4.6	Merkezcil segragasyonların yayılması..... 19
Şekil 4.7	Bant dilme işlemi..... 20
Şekil 4.8	Merkezcil segragasyonların kenarda ortaya çıkması..... 20
Şekil 4.9	Hatalı bir dilme işlemi sonucu meydana gelen bant kenarı..... 21
Şekil 4.10	Dilme ölçüsünün malzeme et kalınlığıyla olan ilişkisi..... 21
Şekil 4.11	Bant açma ünitesi..... 22
Şekil 4.12	Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı boru üretim prosesi.....
Şekil 4.13	Ø 168,3 x 4 mm Boru formunun verilmesinin şematik görüntüsü..... 23
Şekil 4.14	Ön bükme merdanesi..... 23
Şekil 4.15	Seramik bıçaklı finpas merdanesi..... 25
Şekil 4.16	Kaynak bölgesinin şematik görünümü..... 26
Şekil 4.17	Kaynak bölgesinde sıcaklık dağılımı..... 27
Şekil 4.18	Bant kenarında gerçekleşen akım ve ısı dağılımı..... 27
Şekil 4.19	Birleşme esnasında malzeme akışı..... 28
Şekil 4.20	Yüksek frekans sistemi prensip şeması..... 29
Şekil 4.21	Yüksek frekans kaynak inverteri..... 30
Şekil 4.22	Doğru akım kaynağı..... 31
Şekil 4.23	Operatör panosu..... 31
Şekil 4.24	Otomatik kaynak kontrol sistemi elemanları..... 32
Şekil 4.25	Kaynak akımının iletilmesi..... 33
Şekil 4.26	Bant kenarlarının kaynak bölgesine yönleneşmesi..... 34
Şekil 4.27	Çift kaynak üçgeni oluşumu..... 34
Şekil 4.28	Bant kenarlarında homojen ısı dağılımı..... 34
Şekil 4.29	Paralel yönleneşmemiş kenarlarda ısı dağılımı..... 35
Şekil 4.30	Döner tip dikiş kılavuzu..... 36
Şekil 4.31	Çelik malzemelerin kaynağında kullanılan burunlu tip kontakt..... 37
Şekil 4.32	Kontakt yay tertibatı..... 37
Şekil 4.33	Kontaktların boruya teması..... 38
Şekil 4.34	Boru dış çapı ile kaynak üçgeni yüksekliğinin değışimi..... 39
Şekil 4.35	Kaynak üçgeni ölçülerinin et kalınlığına göre değışimi..... 39
Şekil 4.36	Yüksek frekans akımının boruda izlediğı elektriksel yollar..... 40
Şekil 4.37	Elektriksel akımlar..... 40
Şekil 4.38	Empeder uygulamaları..... 41

Şekil 4.39	Empederin boru içerisinde yerleştirilmesi.....	42
Şekil 4.40	İç kazıma aparatı.....	43
Şekil 4.41	İç kazıma işleminde meydana gelen açılar.....	43
Şekil 4.42	Dış kazıma bıçağı (TİP A).....	44
Şekil 4.43	Dış kazıma bıçağı (TİP B).....	45
Şekil 4.44	Tip B dış kazıma bıçağı.....	45
Şekil 4.45	Normalizasyonda tane büyümesi.....	47
Şekil 4.46	Temperleme + Su verme prosesi.....	47
Şekil 4.47	Beyaz kaynak hattı.....	48
Şekil 4.48	Frekans – Penetrasyon derinliği ilişkisi.....	51
Şekil 4.49	3 kHz Frekans altında tavlanan çelikte sıcaklık-penetrasyon derinliği ilişkisi...	51
Şekil 4.50	Çift indüktör uygulamasında sıcaklık gelişimi.....	53
Şekil 4.51	Normalizasyon işleminden sonra serbest soğuma eğrisi Et kalınlığı 3,2mm, hat hızı 76,2 m/dak.....	54
Şekil 4.52	90° Yassılma testi.....	56
Şekil 5.1	Düşük karbonlu çelik boru imalatında kritik frekans.....	57
Şekil 5.2	Bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile sıcaklığın değişimi $f=200$ kHz, $\varnothing 50 \times 2$ mm $V_0 = 150$ m/dak.....	64
Şekil 5.3	Bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile sıcaklığın değişimi $f = 400$ kHz, $\varnothing 50 \times 2$ mm $V_0 = 150$ m/dak.....	66
Şekil 5.4	Şekil 5.4 Kaynak boğazındaki sıcaklık ve elektriksel gücün bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile değişimi $f = 200$ kHz, $\varnothing 50 \times 2$ mm $V_0 = 150$ m/dak.....	67
Şekil 5.5	Kaynak boğazındaki sıcaklık ve elektriksel gücün bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile değişimi $f = 400$ kHz, $\varnothing 50 \times 2$ mm $V_0 = 150$ m/dak.....	67
Şekil 5.6	Kaynak frekansının fonksiyonu olarak kaynak üçgenindeki sıcaklık dağılımı $\varnothing 50 \times 2$ mm $V_0 = 150$ m/dak.....	68
Şekil 5.7	Kaynak frekansının fonksiyonu olarak kaynak üçgenindeki sıcaklık dağılımı $\varnothing 150 \times 8$ mm $V_0 = 40$ m/dak.....	68
Şekil 5.8	Bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile sıcaklığın değişimi $\varnothing 150 \times 8$ mm $V_0 = 40$ m/dak 100 kHz.....	69
Şekil 5.9	Bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile sıcaklığın değişimi $\varnothing 150 \times 8$ mm $V_0 = 40$ m/dak 400 kHz.....	69
Şekil 5.10	Kaynak boğazındaki sıcaklık ve elektriksel gücün bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile değişimi $\varnothing 150 \times 8$ mm $V_0 = 40$ m/dak 100 kHz.....	70
Şekil 5.11	Kaynak boğazındaki sıcaklık ve elektriksel gücün bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile değişimi $\varnothing 150 \times 8$ mm $V_0 = 40$ m/dak 400 kHz.....	70
Şekil 5.12	Kaynak frekansının fonksiyonu olarak kaynak boğazındaki akma dayanımı $\varnothing 50 \times 2$ mm $V_0 = 150$ m/dak.....	71
Şekil 5.13	Kaynak frekansının fonksiyonu olarak akma dayanımı $\varnothing 150 \times 8$ mm $V_0 = 40$ m/dak.....	71
Şekil 5.14	Kaynak frekansının fonksiyonu olarak kaynak makinası gücü $\varnothing 150 \times 8$ mm $V_0 = 40$ m/dak.....	72
Şekil 5.15	Kaynak frekansının fonksiyonu olarak kaynak gücü gereksinimi $\varnothing 50 \times 2$ mm $V_0 = 150$ m/dak.....	72
Şekil 5.16	Karbon segragasyon bantları.....	75
Şekil 5.17	Kaynak sonrasındaki mevcut bölgeler.....	75
Şekil 5.18	Malzeme akış çizgileri doğrultusunda meydana gelen çatlak.....	76
Şekil 5.19	Kaynak üçgeni ve sıcaklık dağılımı.....	77
Şekil 5.20	Ergiyik tabakaların gelişimi.....	78

Şekil 5.21	Beyaz kaynak hattı Ø 323,9 x 7,0 mm, Malzeme X-52 , $V_0 = 25$ m/dak , dört indüktörlü normalizasyon.....	79
Şekil 5.22	Ergiyik metal püskürmesi çevrimi.....	80
Şekil 5.23	Ergiyik metal püskürmesi sonucu meydana gelen dikiş formu.....	82
Şekil 6.1	Noktalama.....	84
Şekil 6.2	Normalizasyon uygulamaları.....	86
Şekil 6.3	Dört kademeli normalizasyon işlemi sonrasında kaynak bölgesi görünümü Ø 323,9 x 7,0 mm, X-52 malzeme, kaynak hızı 25 m/dak.....	86
Şekil 6.4	Dört kademeli normalizasyon işlemi sonrasında kaynak bölgesi görünümü Ø 273 x 5,0 mm, X-52 malzeme, kaynak hızı 30 m/dak.....	87
Şekil 6.5	Normalizasyon sonrası mikro yapılar, Ø 323,9 x 7,0 mm, Malzeme X-52.....	87
Şekil 6.6	Dış kazıma işleminden sonra porozite görünümü.....	88
Şekil 6.7	Kaynak dikiş bölgesinde sıkışmış gaz boşlukları.....	88
Şekil 6.8	Ø 304,8 x 4,6 mm boruda meydana gelen kanca çatlak, malzeme X-42.....	89
Şekil 6.9	Ø 254 x 5,1 mm boruda meydana gelen kanca çatlak, malzeme X-42.....	89
Şekil 6.10	Metal oksit sıkışmasının prensibi.....	90
Şekil 6.11	Yassılma testinde borunun yırtılması.....	91
Şekil 6.12	Kaynak bölgesinde münferit metal oksit sıkışması.....	91
Şekil 6.13	Kaynak bölgesinde dizi halinde metal oksit sıkışması.....	91
Şekil 6.14	Ark atlaması.....	92
Şekil 6.15	Bant kenarında kalan kıymık.....	93
Şekil 6.16	Ark atlaması sonucu oluşan yapı.....	93
Şekil 6.17	Kimyasal analiz numune yerleri.....	94

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 Boru çeliği mekanik özellikleri.....	15
Çizelge 4.2 Boru çeliği kimyasal özellikleri.....	15
Çizelge 4.3 Boru çeliği kimyasal özellikleri.....	16
Çizelge 5.1 Ferritik ve martenzitik yapıdaki mekanik özellikler.....	77
Çizelge 6.1 X-52 Malzemedan alınan ortalama kimyasal analiz % değerleri.....	94
Çizelge 6.2 X-52 Malzeme için üretici firma pota analizi % değerleri.....	94



## ÖNSÖZ

Dünya üzerinde üretilen çeliğin büyük bir kısmı dikişli çelik boru üretiminde, muhtelif yöntemler altında kullanılmaktadır. Yaklaşık 40 senelik bir geçmişe sahip olan yüksek frekans direnç kaynaklı çelik boru üretiminde 670 mm çap, 20 mm et kalınlığı ve 130 m/dak'lık üretim hızına ulaşılmıştır. Yüksek frekans direnç kaynağında indüksiyon ve kondüksiyon yöntemleri olmak üzere iki ayrı teknik mevcuttur.

Halen yaygın olarak kullanılan Yüksek Frekans Kondüksiyon Elektrik Direnç Kaynaklı (YFKEDK) çelik boru üretim hatları 3,5 ton/dak kapasitede üretim yapabilmekte ve bu yöntem su, petrol ve gaz borularındaki artan standartları yakalayarak, sağladığı yüksek imalat hızı ve ekonomiklik gibi avantajlarla, ortak çaplarda spiral kaynaklı (tozaltı kaynağı) borularla kıyaslanabilir olmaktadır.

Böylesine yüksek tonajların kaynak yapıldığı bu yöntemde ortaya çıkabilecek hataların fire oranını arttırarak maliyeti etkilemesi ve üretimi kesintiye uğratması riski, bu hataların hızlı ve doğru bir şekilde tanımlanması, sebeplerinin tespit edilmesi ve giderilmesi zorunluluğunu getirir.

Bu çalışmada YFKEDK ile çelik boru üretiminin temel prensipleri, kaynaktaki metalurjik olaylar ve yaygın olarak karşılaşılan 7 temel hata detaylarıyla açıklanmıştır.

Deneysel çalışmalar ve gözlemler, üretim ve planlama departmanlarında da görev aldığım Ümran Çelik Boru A.Ş. Akçakoca tesislerinde gerçekleştirilmiştir.

Tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen başta laboratuvar çalışanları olmak üzere tüm fabrika personeli ve danışmanım Prof. Nurullah GÜLTEKİN'e teşekkür eder, çalışmanın tüm mühendis ve araştırmacılara faydalı olmasını dilerim.

## **ABSTRACT**

Welding parameters and defect formation relationships are examined in high frequency conduction welding, which is one of the techniques consume the significant part of the world's steel production. High frequency is explained both with its teory and the metallurgical effects on the weld seam.

Welding parameters and defect formation relationships are exposed and 7 common defect types are defined and with experimental studies reason-result relations are proved. Weld area microstructures analysed with various destructive and non-desructive control methods.

The major part of the defects which occur in the weld mostly depends on line mechanical settings and electrical origined problems, by taking precautions we can increase productivity and decrease material loss and in conclusion we can obtain significant amount of money savings.

**Keywords :** High frequency, weld defects, steel pipe, metalografic examination, crack



## ÖZET

Dünyada üretilen çeliğin en büyük oranda kullanıldığı proseslerden biri olan yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı boru üretim prosesindeki kaynak parametreleri ve hata oluşum ilişkileri incelenmiştir.

Yüksek frekans, teorisi ve kaynak dikişindeki metalurjik etkileriyle açıklanmıştır. Kaynak parametreleriyle hata oluşum ilişkileri ortaya konularak 7 yaygın hata türü tanımlanmış ve deneysel çalışmalarla sebep-sonuç ilişkileri ispatlanmıştır. Kaynak bölgesi mikroyapıları tahribatlı ve tahribatsız bir çok kontrol yöntemiyle analiz edilmiştir.

Kaynakta ortaya çıkan hataların önemli bir kısmı genelde hat mekanik ayarları ve elektriksel kökenli problemlere dayanmaktadır. Önlemler alarak verimi arttırıp ve malzeme kayıplarını azaltabilir ve sonuçta önemli miktarda parasal tasarruf sağlayabiliriz.

**Anahtar Kelimeler :** Yüksek frekans, kaynak hataları, çelik boru, metalografik inceleme, çatlak



## 1. GİRİŞ

Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı çelik boru üretiminde meydana gelen hataların tespiti, özellikle gaz ve petrol borularındaki yükselen standartlar dikkate alındığında önem kazanmaktadır. Tahribatsız muayene tekniklerinin gelişmesiyle hataların tespit edilmeleri kolaylaşmıştır. Düzeltici faaliyetlerin ivedilikle uygulanabilmesi için tespit edilen hataların doğru olarak tanımlanabilmesi ve sebeplerinin ortaya konulabilmesi gereklidir.

Bölüm 2’de daha önceki araştırmacıların yöneldikleri konulara değinilmiştir.

Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı çelik boru üretiminde ürün kalitesi karmaşık olmayan çok fazla parametre ile belirlenir. İşlem parametreleriyle hata oluşum ilişkilerinin incelenmesi için öncelikle prosesin tamamen anlaşılabilmesi gereklidir. Bunun için Bölüm 3’de diğer boru üretim teknikleri ve yüksek frekans yönteminin avantajları, Bölüm 4’de ise proses ve kalite kontrol aşamaları detaylı olarak açıklanmış, metalurjik, fiziksel ve metalografik özellikler Bölüm 5’de ayrıca incelenmiştir. Bölüm 6’da işlem parametreleriyle hata oluşum ilişkileri incelenmiş ve yaygın olarak meydana gelen hatalar tanımlanmıştır. Sonuç kısmında teorik ve deneysel çalışmalarla ortaya konulmuş kurallar tekrarlanmış ve proses kontrolü üzerine tavsiyelerde bulunulmuştur.

Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı çelik boru imalatında, merdaneler arasında soğuk şekillendirilerek açık boru formu verilen, sıcak haddelenmiş çelik bandın kenarlarına, osilatörden gelen yüksek frekans akımı, temas eden kontaklar vasıtasıyla verilir. Bant kenarları kaynak merdanelerine gelmeden önce birleşmiş ve kaynak üçgeni olarak adlandırılan bölgeyi meydana getirmişlerdir. Yüksek frekans akımı yüzeyden çok az bir derinlikte akar ve minimum düzeyde ergime gerçekleşir. Meydana gelen oksitler ve diğer yabancı malzemeler binme prosesi esnasında dışarı atılır. Kaynak merdaneleri arasından geçen bant kenarları boru formunu alır. Kalite kontrol ve bitirme işlemleri sonrasında boru üretimi tamamlanmış olur.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Genel olarak yüksek frekans kaynağı ile ilgili çalışmaların çoğunluğunu, kaynak ve diğer yardımcı ünitelerin imalatını yapan firmaların ürettikleri sistemlerdeki yeni teknolojileri açıklamaya yönelik, çeşitli kongre, endüstriyel dergi ve kendi yayınlarında sundukları makaleler oluşturmaktadır. Osilatör, empeder ve indüksiyon tavlama üniteleri imalatçıları bunların başında yer almaktadır. Morin ve Scott'un (1995-1996) yüksek frekansın kaynak üzerindeki etkilerini inceledikleri yayınlar bunlara örnektir.

Changchun'un (1996) yüksek frekans kaynağında elde edilen kaynak kesitlerini inceleyerek malzeme akış çizgileri ile kaynak parametrelerinin kontrolü üzerine yaptığı çalışma oldukça önemlidir.

Haga v.d., (1979) çelik boru kaynağı üzerine Amerikan Kaynak Derneği yayınlarında çıkan çalışmalarında, daha sonraları "ergiyik püskürmesi" olarak tanımlanan, kaynak alanı içerisindeki ergiyik metalin kararsızlık halini incelemişlerdir.

Oppenheimer (1996-1998) yüksek frekans boru üretiminin incelenmesi üzerine yazdığı 6 makalede proses detaylarıyla açıklanmış ve bilhassa kaynaktaki metalurjik oluşumlar kapsamlı olarak incelenmiştir.

Edison Kaynak Enstitüsü'nde (EWI) prosesle ilgili araştırma projeleri halen yürütülmektedir.

Ultrasonik kontrol ve yüksek hız optik sistemlerle ilgili yayınlarda da dolaylı olarak yüksek frekans prosesi araştırılmıştır. Konolalov, v.d (1989) tarafından yüksek hız kameraları ile yüksek frekans kaynak prosesinin incelenmesi üzerine yapılan çalışma buna örnek verilebilir.

Yüksek frekans kaynağında meydana gelen hataların derlendiği iki çalışma Bell (1993) ve Nichols (1996) tarafından yayınlanmıştır.

Batelle Memorial Institute (1962) tarafından Bethlehem Steel Corporation adına, yüksek frekans kondüksiyon kaynaklı çelik borularda meydana gelen çatlak problemlerinin araştırıldığı bir rapor yayımlanmıştır. Bu çalışmada bilhassa kanca çatlaklar hakkında önemli tespitler mevcuttur.

Bir çok prensibinin yüksek frekans kondüksiyon kaynağı ile benzer olduğu yüksek frekans indüksiyon kaynağındaki yöntem parametrelerinin kaynak dikiş kalitesi üzerine olan etkilerinin ele alındığı bir makale Kaynak Teknolojisi I. Ulusal Kongresinde Şirin (1997) v.d. tarafından sunulmuştur.

### 3. YÜKSEK FREKANS KONDÜKSİYON ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAKLI ÇELİK BORU İMALATINA GİRİŞ

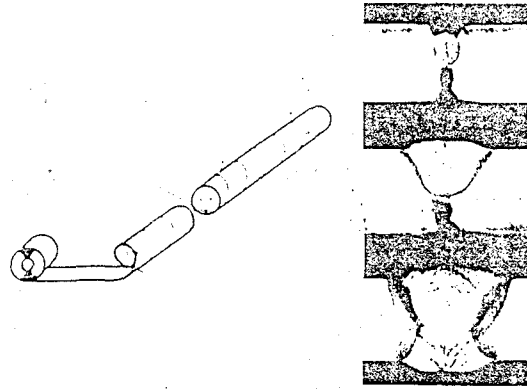
Aşağıdaki bölümlerde, yüksek frekans tekniğinin sağladığı temel avantajların anlaşılabilmesi için öncelikle yaygın olarak kullanılan dikişli boru üretim teknikleri açıklanmış, kondüksiyon ve indüksiyon yöntemleri ayrıca kıyaslanmıştır.

#### 3.1 Diğer Dikişli Çelik Boru Üretim Yöntemleri

Yüksek frekans elektrik direnç kaynağı yönteminin dışında, dikişli boru üretimde yaygın olarak kullanılmakta olan spiral kaynak, genişletilmiş füzyon, sürekli alın kaynağı, elektrik direnç kaynağı ve yüksek frekans indüksiyon elektrik direnç kaynağı yöntemleri, aşağıdaki bölümlerde, temel prensipleriyle açıklanmıştır.

##### 3.1.1 Spiral Kaynak Yöntemi

Spiral kaynaklı çelik boru imalatında bant açma ünitesinden hatta alınan rulo halindeki bant malzemeye kenar frezeleriyle kaynak ağızı açılır. Hatta ilerleyen bandın makara sistemi yardımıyla spiral formu alması ve bant kenarlarının karşı karşıya gelmesi sağlanır. Dış ve iç kaynak, tozaltı kaynak yöntemiyle yapılır. Borunun istenilen boyda kesilmesi ise genelde plazma yöntemiyle gerçekleştirilir. Kalite kontrol aşamalarından sonra boru üretimi tamamlanmış olur.



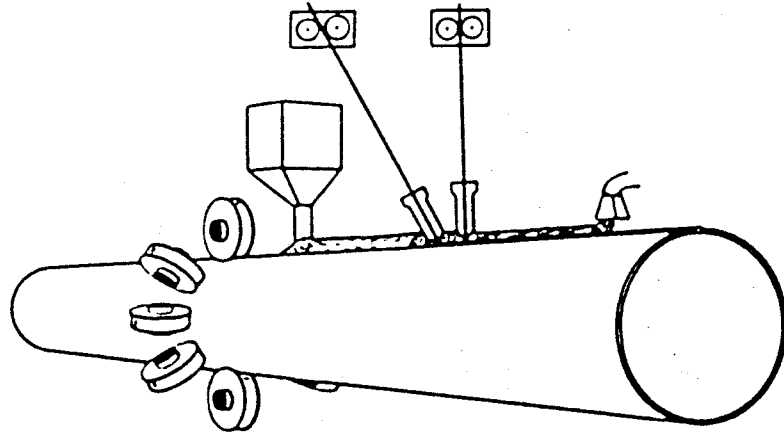
Şekil 3.1 Spiral kaynaklı çelik boru imalatı prensip resmi



Şekil 3.2 Spiral kaynaklı çelik boru imalatı

Bu yöntemde 150-3000 mm dış çap ve 4-25 mm et kalınlıklarında üretim gerçekleştirilebilir. Üretim hızının çok düşük ve kaynaktan sonra çoğu zaman tamir işlemlerinin gerekli olması, bu yöntemin dezavantajlarıdır. Birim boru boyuna düşen kaynak dikişi uzunluğunun fazla olması borunun mukavemetini arttırmaktadır. Bu yüzden kazık borusu uygulamalarında spiral kaynaklı borular tercih edilmektedir.

### 3.1.2 Genişletilmiş Elektrik Füzyon Yöntemi



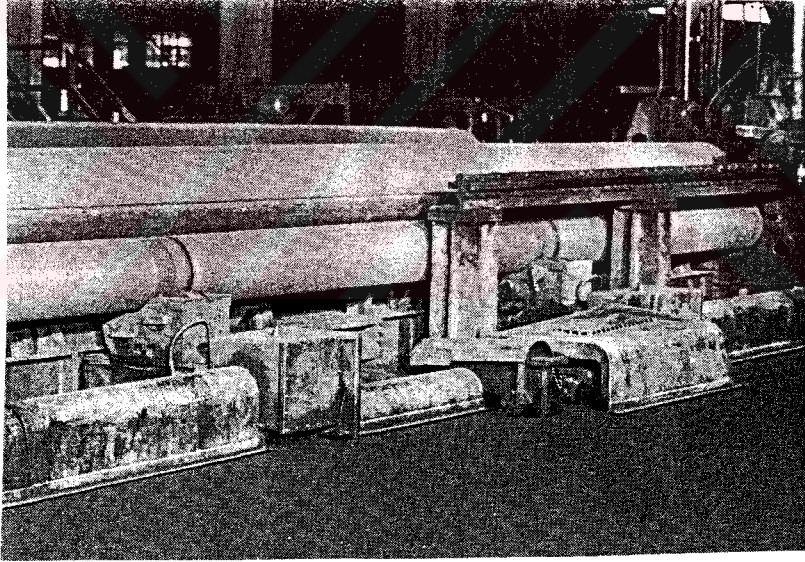
Şekil 3.3 Genişletilmiş füzyon yöntemi prensip resmi

Plaka halindeki elik malzemede kaynak işlemi için gerekli iyi bir yüzeyi elde edebilmek için kenarlar işlenir ve kumlanır. n Şekillendirme merdanelerinde plaka kenarlarının bükümü gerçekleştirilir.

İstenilen boru formunun verilebilmesi için plaka, l merdane sisteminde, silindir formunu alana kadar soğuk Şekillendirilir.

Açık boru formunun elde edilmesinden sonra kaynak ünitesinde, toz altı kaynağı yöntemiyle, önce dış, ardından da iç kaynak gerçekleştirilir. Kaynak işlemi tamamlanan boru ağızlarının istenilen nihayi ölçülere getirilmesi mekanik Şişirme tezgahlarında gerçekleştirilir. Bu işlemin ardından borunun tamamı bir kalıp içerisine alınarak hidrolik basıncı altında kalıp formunu alması sağlanır.

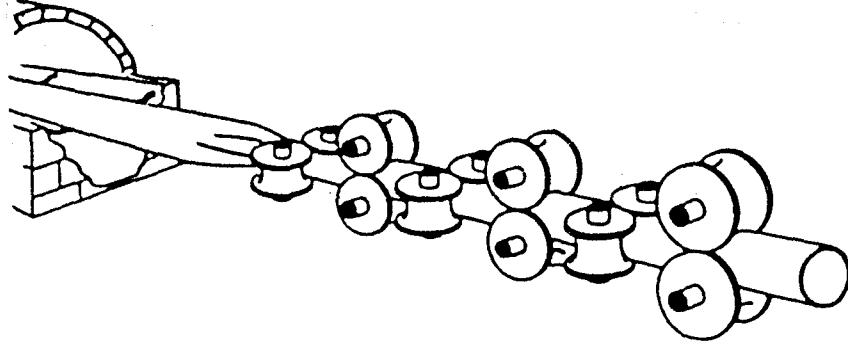
Kalıp içerisinde Şişirme prosesi esnasında ayrıca boru hidrolik olarak testi edilmiş olur. Diğer kalite kontrol aşamalarından sonra boru üretimi tamamlanır.



Şekil 3.4 Hidrolik Şişirme uygulaması

Bu yöntemde elde edilebilen boruların dış çapları 500 – 800 mm ve et kalınlıkları ise 6,5 – 12,5 mm aralığında olabilmektedir.

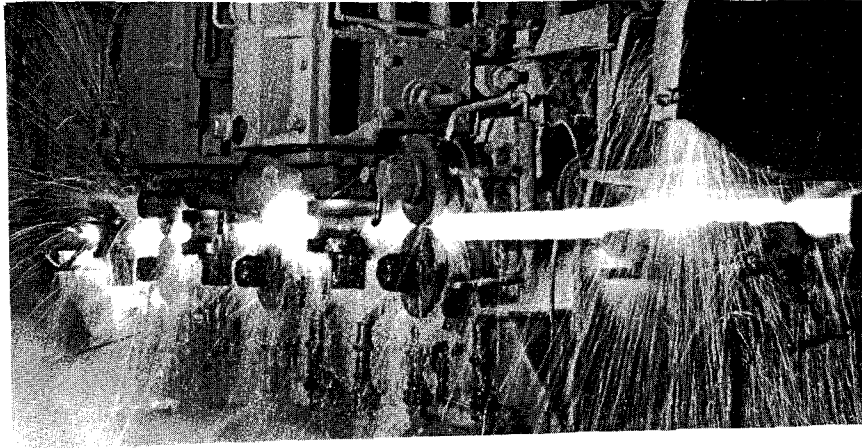
### 3.1.3 Sürekli Alın Kaynağı Yöntemi



Şekil 3.5 Sürekli alın kaynağı prensip resmi

Hatta alınan rulo bant malzeme bir ısı tüneline girilerek kaynak sıcaklığına kadar ısıtılır. Isı tüneli çıkışında bantta şekillendirme ve kaynak merdaneleri arasında boru formu verilir.

Hatta yeni bir bant verilmesiyle, sürekli bir şerit oluşturabilmek için, bir önceki bant sonuyla yeni verilen bant, hat yürümeye devam ederken alın kaynağı ile birleştirilir. Bu yüzden Bant açma ve ısı tüneli girişi arasındaki mesafe çok fazla tutulur ve bantın son kısımları serbest bırakılmıştır. Böylelikle üretimin sürekliliği ve şekillendirme merdanelerinin sabit bir hızda çalışabilmeleri sağlanır. Isı tüneline elde edilen sıcaklık ve hat hızı otomatik kontrolle senkronize edilmiştir. Kaynak işlemi tamamlanan malzemenin istenilen boylarda kesilmesi, kalibrasyon, doğrultma ve kalite kontrol aşamalarından geçmesiyle boru üretim prosesi tamamlanır.

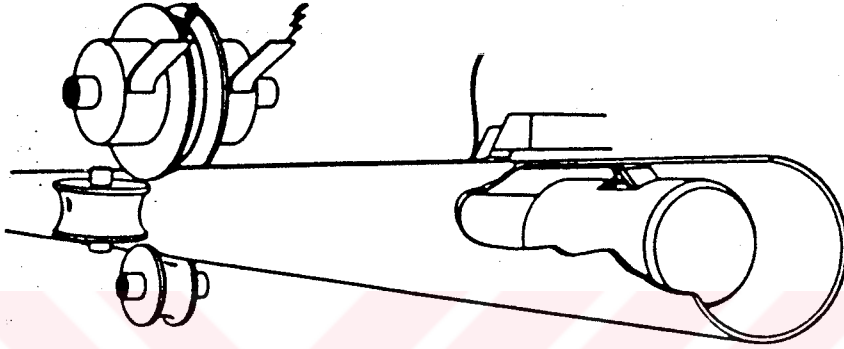


Şekil 3.6 Sürekli alın kaynağı prosesi

Bu yöntemde elde edilebilen boruların dış çapları 3 – 100 mm arasında değişebilmekte ve ASTM-A53, ASTM-A120 ve API-5L standartlarında üretim yapılabilmektedir.

Tüm malzemenin ısıtılması sonucu ortaya çıkan yüksek enerji tüketimi ve tufal oluşumu bu yöntemin dezavantajlarıdır.

### 3.1.4 Elektrik Direnç Kaynağı Yöntemi



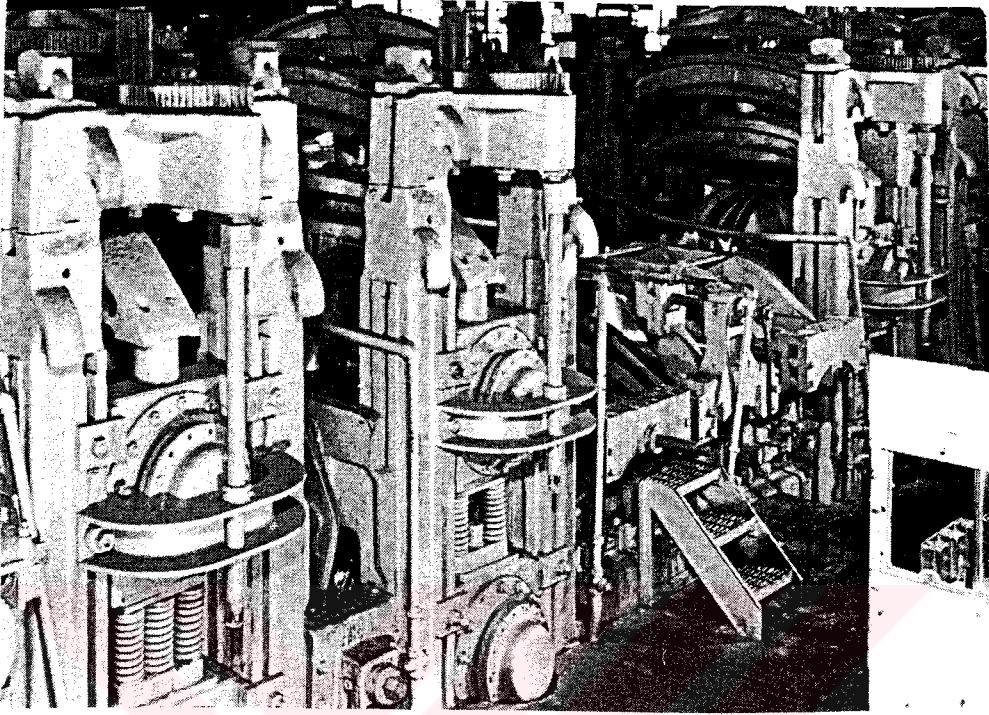
Şekil 3.7 Elektrik direnç kaynağı prensip resmi

Hatta alınan bant malzemedeki, iyi bir yüzey kalitesi elde edebilmek için dairesel bıçaklarla kenar dilme işlemi uygulanır. Bir dizi merdane arasında gerçekleştirilen soğuk şekillendirme ile açık boru formu verilir.

Dairesel formdaki, dönen elektrodlar tarafından iletilen kaynak akımıyla, bant kenarlarının kaynak sıcaklığına çıkması ve kaynak merdaneleri arasında, ilave bir metal katkısı olmadan birleşmesi sağlanır. Burada gerçekleşen kaynak işlemi, basınç veya dövme kaynağı olarak adlandırılan kaynak yöntemleriyle benzer prensiplere sahiptir. Bağ düzleminde, boru iç ve dış çap doğrultularında fişkırtılan ergiyik metal, çevre atmosferi etkisiyle ani olarak katılarak kaynak dikiş bölgesi üzerinde kaynak fitili olarak adlandırılan kısmı oluşturur. Boru formunun elde edilmesi için iç ve dış kaynak fitilleri bıçaklar vasıtasıyla kazınır.

Kaynak işlemi tamamlanan malzemenin istenilen boylara kesilerek, kalibrasyon, doğrultma ve kalite kontrol aşamalarından geçmesiyle boru üretim süreci tamamlanır.

Bant malzeme yerine, üretilmesi istenilen boru boyunda plakaların tek tek hatta verilmesi uygulamaları da vardır. Bu durumda boy kesme işlemi ortadan kalkmakta fakat toplam üretim kapasitesi azalmaktadır.



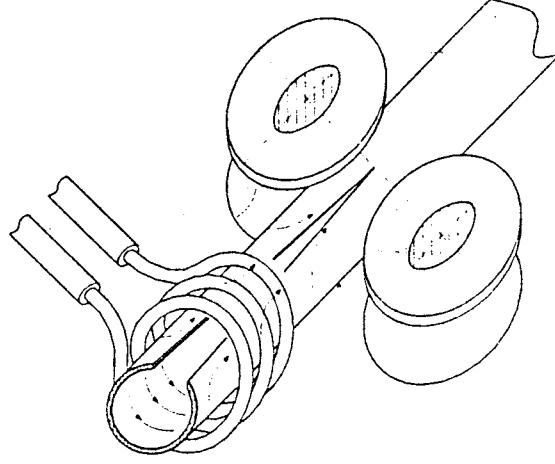
Şekil 3.8 Elektrik direnç kaynaklı çelik boru üretim prosesi

Bu yöntemde elde edilebilen boruların dış çapları 60 – 400 mm arasında değişebilmekte ve pratikte tüm standartlarda üretim yapılabilmektedir.

### 3.1.5 Yüksek Frekans İndüksiyon Elektrik Direnç Kaynağı Yöntemi

Yüksek frekans tekniği elektrik direnç kaynaklı boru üretiminin geliştirilmiş bir uygulamasıdır. Frekansın artmasıyla nüfuziyet derinliği düştüğünden bant kenarlarında minimum bir derinlikte ergime gerçekleşir ve oldukça dar bir ITAB meydana gelir.

Bu kaynak yöntemi, yüksek frekans akımının bant kenarları arasında oluşturulan ve kaynak üçgeni olarak adlandırılan bölgeye aktarılmasında kullanılan tekniğe göre indüksiyon veya kondüksiyon kaynağı adını alır.



Şekil 3.9 İndüksiyon kaynağı prensip resmi

Yüksek frekans indüksiyon elektrik direnç kaynağı yönteminde elde edilen yüksek frekans akımı borunun arasından geçtiği bir indüksiyon koili tarafından kaynak üçgenine verilir.

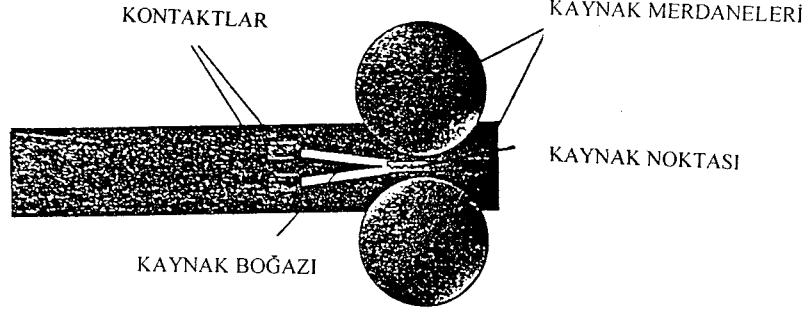
Frekansın artmasıyla nüfuziyet derinliği düştüğünden bant kenarlarında çok düşük bir derinlikte ergime gerçekleşir. Kaynak sıcaklığında birleşen bant kenarları kaynak merdaneleri arasından geçirilir.

Ergiyen malzemenin hemen hemen tamamı binme prosesinde boru iç ve dış çap doğrultusunda fişkirarak kaynak fitilini meydana getirirler. İç ve dış kazıma proseslerini kalibrasyon, boy kesme, doğrultma ve kalite kontrol işlemleri izler ve boru üretimi tamamlanmış olur.

### 3.2 Yüksek Frekans Kondüksiyon Elektrik Direnç Kaynaklı Çelik Boru İmalatına Giriş

Yüksek frekans tekniğinin konvansiyonel elektrik direnç kaynağı yönteminin gelişmiş bir uygulaması olduğu önceki bölümlerde açıklanmıştı. Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı çelik boru üretiminin temel prensipleri indüksiyon yöntemiyle aynıdır.

Kondüksiyon yöntemindeki tek fark, yüksek frekans akımının kayan kontaktlar vasıtasıyla bant kenarlarına iletilmesidir.



Şekil 3.10 Kondüksiyon kaynağı prensip resmi

Bir çok yayında esasının dövme kaynağı, demirci kaynağı veya basınç kaynağı gibi yöntemlere dayandığı söylenebilir, yüksek frekans kondüksiyon kaynağı için teknik literatürde bilimsel bir tanımlamaya rastlamak mümkün değildir. Bu tip kaynak için sıcak difüzyon bağı prosesi demek uygun olacaktır. Metalsel malzemelerin birleştirilmesinde en kaliteli sonuçlar veren yöntem difüzyon bağıdır. Bu prosesteki önemli parametreler basınç, sıcaklık ve zamandır. İhtiyaç duyulan süre sıcaklıkla ters orantılıdır.

Burada bir konunun altı çizilmelidir; yüksek frekans kondüksiyon kaynağında ergime gerçekleşir fakat ergiyik metalin neredeyse tamamı binme prosesi esnasında fişkırtılarak uzaklaştırılır.

### 3.2.1 Yüksek Frekans Tekniğinin Düşük Frekansa Göre Avantajları

Günümüzde konvansiyonel olarak nitelendirebileceğimiz düşük frekans boyuna elektrik direnç kaynaklı boru üretim tesislerinin büyük bir çoğunluğu yüksek frekansa geçmektedir.

Yüksek frekansın getirdiği avantajlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

- a) **Düşük Enerji Girdisi İhtiyacı**  
Aynı miktarda üretim için yüksek frekansda, düşük frekansa kıyasla yaklaşık iki kat daha az enerji gereksinimi vardır.
- b) **Yüksek Produktivite**  
Yüksek frekans yönteminde ulaşılan hızlar çok daha yüksektir.
- c) **Daha Az Binme Kaybı**  
Yüksek frekansta meydana gelen nispeten dar ITAB sayesinde, daha dar bant genişliklerine ihtiyaç vardır ve böylelikle malzemeden tasarruf edilmektedir.
- d) **Daha Düşük Elektrod Değiştirme ve Bakım Süresi**  
Günümüzde ulaşılan teknolojiye yüksek frekansta kullanılan elektrodlar daha ucuz ve dayanıklı olup değiştirilme zamanları düşüktür.
- e) **Daha Geniş Malzeme Serbestisi**  
Yüksek frekans yönteminin uygulama sahası düşük frekansta olduğu gibi sadece yumuşak çeliklerle sınırlı değildir. Alaşımli çelikler, paslanmaz çelikler ve galvaniz veya alüminyum kaplı çeliklerin yüksek frekans kaynağı ile boru yapılması mümkündür.
- f) **Daha Geniş Boyut Aralıkları**  
Yüksek frekans yöntemiyle çok özel durumlarda 9,5 mm çap ve 0,12 mm et kalınlığındaki pirinç radyatör borularından, 1524 mm çap ve 19 mm et kalınlığındaki çelik hat borularına kadar geniş bir yelpazede imalat yapılabilir. Düşük frekans yönteminin alt sınırı kenar dalgalanmasına olan eğilimden dolayı 0,7 mm'dir. Üst sınır ise bu et kalınlığının üzerinde ihtiyaç duyulan yüksek enerji girdisi gereksinimleriyle artan maliyetlerden dolayı 4,5 mm'dir (Hubbard, 1980).
- g) **Daha Düşük Yüzey Hazırlığı**  
Yüksek frekans yönteminde işlenmemiş çelikler bile aşırı maliyetler getiren kumlama ve diğer yüzey temizleme işlemlerine ihtiyaç duyulmadan kullanılabilir.
- h) **Daha Düşük Hurda**  
Düşük frekans altında çalışan bir tesisinin randımanı yüksek frekansla çalışan bir tesise göre yaklaşık % 3-5 daha düşüktür (Hubbard, 1980).

### 3.2.2 Kondüksiyon İle İndüksiyon Arasındaki Farklar

Yüksek frekans kaynağı, akımın kayan kontaktlardan verildiği kondüksiyon ve akımın birkaç sarımlı bir koil vasıtasıyla verildiği indüksiyon yöntemlerinden birisiyle yapılmaktadır. Temel fark açıklandığı gibi akımın kaynak bölgesine ulaştırılmasındadır.

Kondüksiyon ve indüksiyon yöntemlerinin getirdiği avantajlar sırasıyla Bölüm 3.2.2.1 ve Bölüm 3.2.2.2'de açıklanmıştır.

#### 3.2.2.1 Kondüksiyon Yönteminin Avantajları

- Üretilen birim malzeme miktarı başma daha düşük enerji gereksinimi vardır.
- Üretilen tüm boru çapları için çoğu zaman tek bir çift kontakt ucu kullanılır. İndüksiyon yönteminde ise değişik çaplar için değişik ebatta koiller kullanılır.
- Kaçak akımların önlenmesi için empeder kullanımı daha az önemlidir ve 150 mm dış çapın üzerindeki boru üretiminde gerekli değildir.
- Eğer çalışma esnasında indüksiyon koilinin sökülmesi gerekirse, borunun belirli bir kısmının kesilmesi gerektiğinden fire oranı artar. Kondüksiyon yönteminde buna gerek yoktur.
- Kondüksiyon yönteminde kaynak bölgesindeki mekanik ekipmanların gerçekleşen indüksiyondan dolayı ısınması daha azdır.
- Kondüksiyon yöntemiyle, kare veya diğer formlardaki profil üretimi rahatlıkla yapılabilir buna karşın indüksiyon yönteminde köşeler aşırı ısınır ve güç kaybı ortaya çıkar.
- Kaynak üçgenini kısa tutmak kondüksiyon yönteminde daha kolaydır. İndüksiyon koilinin yerleştirilmesi ise çoğu zaman kaynak merdaneleri ölçüleri ile sınırlandırılır.
- Kaynak üçgeninin uzatılması ve bant kenarlarına ön yumuşatma işleminin uygulanmasıyla kalın çeperli ve yüksek alaşım malzemelerin kaynağı kolaylıkla gerçekleştirilebilir.

#### 3.2.2.2 İndüksiyon Yönteminin Avantajları

- Kontaktlar sürekli temas ettiklerinden aşınır ve periyodik olarak değiştirilmeleri gerekir. Koiller ise ancak bir kaza sonucu hasara uğradıklarında değiştirilir.
- Kontaktlar uygun şekilde yerleştirilmezlerse boru üzerinde iz yapma eğilimindedirler.
- Kaplamalı malzemelerin kaynağında kontaktlar kaplamayı kaldırır ve sık sık temizlenmeleri gerekir.
- Uygunsuz ön boru formu oluşturulması sonucu dalgalı kenarlar meydana gelmesi durumunda bilhassa ince et kalınlıklarının kondüksiyon kaynağında problemler ortaya çıkabilir. Titreşimlerden dolayı temas kesilebilir ve ark patlamaları meydana gelebilir.

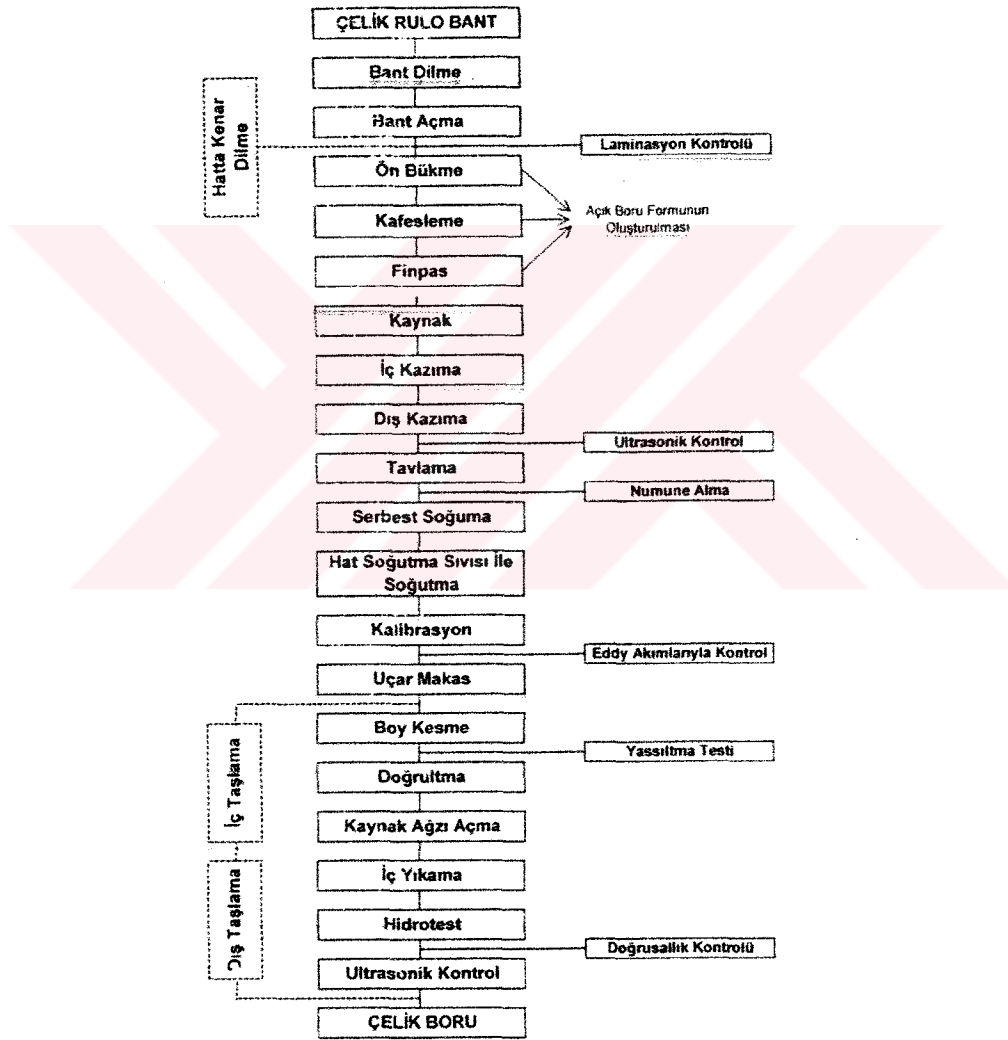
- e) Dikiş dönmesi olarak adlandırılan, genellikle şekillendirme makaralarının düzgün ayarlanmaması sonucu açık borunun kendi ekseni üzerinde dönmesi durumu indüksiyon kaynağında daha az önemlidir.
- f) İndüksiyon kaynak üniteleri kontakt yönteminde kullanılanlara göre daha ucuzdur.

### 3.2.2.3 İndüksiyon ve Kondüksiyon Seçim Kriterleri

Kondüksiyon veya indüksiyon yöntemleri tercih edilirken yukarıda sıralanan avantajlar dikkate alınsa da, ana kriter imal edilecek boru ölçüleridir. Normal olarak indüksiyon yöntemi, et kalınlıkları düşük olan 75-100 mm dış çaptaki, yumuşak çelik ve düşük alaşımlı malzemelerin kaynağında kullanılır. 100 mm dış çap ve 4,5 mm et kalınlığı değerlerinin üzerinde, bilhassa yüksek alaşımlı çeliklerin kaynağında kondüksiyon yöntemi kullanılır. Ekonomik olarak bakılırsa, örneğin 101,6 mm dış çaptaki boru üretiminde enerji gereksinimi, kondüksiyon yönteminde ihtiyaç duyulan enerjinin yaklaşık iki katıdır. Ayrıca empeder kullanımı çok önemlidir ve kullanılan empederlerin fiyatları da daha pahalıdır (Hubbard, 1980).

#### 4. YÜKSEK FREKANS KONDÜKSİYON ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAKLI ÇELİK BORU ÜRETİMİ VE KALİTE KONTROL AŞAMALARI

Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynağındaki aşamaların çok karmaşık olduğu söylenemez fakat nihayi ürün kalitesi düşünüldüğünde, işlemden çok fazla değişken ve bu değişkenler arasındaki çok fazla etkileşimden söz edilebilir. Aşağıdaki bölümlerde, bu yöntemle çelik borunun elde edilmesiyle ilgili tüm aşamalar ve parametreler önem derecelerine göre detaylı olarak açıklanmıştır. Sürekli kalite kontrol, boru üretiminin vazgeçilmez bir parçası olduğu için hatta yapılan kalite kontrol işlemleri de başlıklar altında incelenmiştir.



Şekil 4.1 Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı çelik boru imalatında iş akışı

#### 4.1 Çelik Rulo Bant

Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı çelik boru imalatında sıcak haddelenmiş çelik rulo bantlar kullanılır.

Yaygın olarak St 37, St 44, X-42, X-46, X-52, X-60, X-65, Gr-A, Gr-B, 3sp, 10sp, v.b. çelikler tercih edilmektedir. Belirtilen bu genel çelik kaliteleri içerisinde gerek API, TS, ASTM, v.b. standartlar gerekse müşteri spesifikasyonları doğrultusunda, alaşım elementleri kimyasal dağılımları açısından sınırlamalar olabilir.

Çizelge 4.1 Boru çeliği mekanik özellikleri (TS 1997)

Boru Tipi	Malzeme	Çekme Dayanımı (kgf / mm <sup>2</sup> )	Akma Sınırı (kgf / mm <sup>2</sup> ) min.		Kopma Uzaması (L <sub>0</sub> = 5 d <sub>0</sub> ) (%) min.
			Et Kalınlığı (t) (mm)		
			t ≤ 16	16 < t < 40	
DÇB 1 <sup>5</sup>	Fe 33	33-50	-	19 <sup>1)</sup>	18
	Fe 37	37-45	24	23	23
	Fe 42	42-50	26	25	20
DÇB 2 <sup>5</sup>	Fe 34.2	34-42	21	20	26
	Fe 37.2	37-45	24	23	23
	Fe 42.2	42-50	26	25	20
	Fe 52.3	52-62 <sup>2)</sup>	36 <sup>3)</sup>	35 <sup>4)</sup>	22

1) 25 mm ve daha büyük kalınlıklar için geçerlidir.  
2) Akma sınırı değeri tutmak koşuluyla 50-64 olabilir.  
3) Et kalınlığı ≤ 3 mm ve dış çap ≤ 30 mm olan borularda 1 kgf/mm<sup>2</sup> kadar küçük olabilir.  
4) 16-30 mm et kalınlıkları için  
5) DÇB 1 180 ° C sıcaklık ve 25 kgf / mm<sup>2</sup> iç basınca , DÇB 2 300 ° C sıcaklık ve 64 kgf / mm<sup>2</sup> iç basınca dayanıklı çelik boruları temsil etmektedir.

Çizelge 4.2 Boru çeliği kimyasal özellikleri (TS1997)

Malzeme	Bileşim Elementleri Kepçe Analizi Maksimum Değeri (%)					
	C	Si	Mn	P	S	N <sup>1)</sup>
Fe 33	-	-	-	-	-	-
Fe 37	0,2	-	-	0,08	0,05	-
Fe 42	0,25	-	-	0,08	0,05	-
Fe 37.2	0,2	-	-	0,06	0,05	0,007
Fe 42.2	0,25	-	-	0,06	0,05	0,007
Fe 52.2	0,22	0,55	1,5	0,05	0,05	0,009

1) Elektrikli ocaklarda oluşturulan çeliklerde 0.012 olabilir.

Çizelge 4.3 Boru çeliği kimyasal özellikleri (API 5L)

SINIF	Karbon maks. <sup>a</sup>	Mangan maks. <sup>a</sup>	Fosfor		Kükürt maks.	Diğer
			min.	maks.		
A25 C I II	0,21	0,60	-	0,030	0,030	-
A25 C I II	0,21	0,60	0,045	0,080	0,030	-
A	0,22	0,90	-	0,030	0,030	-
B	0,26	1,20	-	0,030	0,030	b,d
X-42	0,26	1,30	-	0,030	0,030	c,d
X-46, X-52, X-56	0,26	1,40	-	0,030	0,030	c,d
X-60 <sup>e</sup>	0,26	1,40	-	0,030	0,030	c,d
X-65 <sup>e</sup>	0,26	1,45	-	0,030	0,030	c,d
X-70	0,26	1,65	-	0,030	0,003	c,d

a - Belirtilen maksimum karbon içeriğinin altındaki her %0,01'lik düşüm için, belirtilen maksimum mangan oranında % 0,05'lik bir artışa müsaade edilebilir. Mangan oranındaki bu artışın üst sınırı X-42 ve X-52 arasındaki çelikleri için % 1,50, X-52'den X-70'e kadar olan çelikler için % 1,65 , X-70 ve üstü çelikler için ise % 2,00'dir.

b - Niobyum, vanadyum ve titanyum kullanılması imalatçı ve müşteri arasındaki anlaşma ile belirlenir.

c - Niobyum, vanadyum, titanyum kullanımı imalatçının inisiyatifindedir.

d - Niobyum, vanadyum ve titanyum'un alaşımdaki toplam oranı %0,15'i geçemez.

e - Diğer kimyasal kompozisyonlar, madde d'de belirtilen limit değer ile fosfor ve sülfür'ün tablo değerlerinin sağlanması durumunda müşteri ve imalatçı arasındaki anlaşmaya göre oluşturulabilir.



Şekil 4.2 Sıcak haddelenmiş çelik bantlar

İmal edilen boru kalitesi ergitme, döküm, dilme, şekil verme, kaynak ve tavlama işlemleriyle belirlenir. Bu işlemlerin tümü ilişkili olduğu için birlikte incelenmelidirler.

#### 4.1.1 Çelik Ergitme Yöntemleri

Bir çok yöntem bulunmasına karşın en yaygın olarak elektrik ark ve bazik oksijen fırınlarında ergitme teknikleri uygulanmaktadır.

Çelik ve boru üretiminin birlikte yapıldığı entegre tesislerde, boru üretimi esnasında ortaya çıkan hurdanın tekrar elektrik ark ocaklarına dönüşü söz konusudur. Bu durumda krom, nikel, molibden, vanadyum v.b. kalıntı elementlerin zamanla yığılması ve kimyasal yapının bozulması durumu ortaya çıkabilir.

Bazik oksijen metodunda, hazırlanan şarja çok az miktarda hurda katıldığından kalıntı elementlerin problem yaratma olasılığı çok daha düşüktür.

#### 4.1.2 Çelik Döküm Yöntemleri

En yaygın uygulamalar ingot kalıplara döküm ve sürekli döküm yöntemleridir.

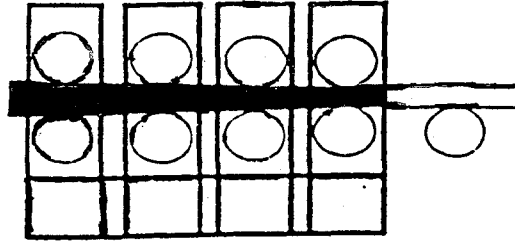
İngot kalıplara dökülen metalin soğuması çok uzun sürer. Bu uzun katılaşma süreci kimyasal ve mikroyapısal açıdan homojen olmayan bir ürünün oluşmasına yol açar. İngotun en son katılaştığı kısmı merkezidir ve bu nedenle ingot merkezi, alaşım elementleri ve empüritelerce dış kısımlara kıyasla daha yüksek bir konsantrasyona sahip olma eğilimindedir.

Sürekli döküm yöntemi ise kalite açısından iki önemli fayda sağlar; birincisi, arttırılmış soğuma hızı neticesinde katılaşma için gereken zaman düşmekte, böylelikle segragasyonlar azalmakta ve daha homojen bir yapıya ulaşılmaktadır. İkinci olarak ise, elde edilen ürünün nihayi ürüne boyutsal yakınlığı daha fazla olduğundan daha az ve kontrollü haddeleme yapılabilen elde edilen yüzey kaliteleri de daha iyi olmaktadır.

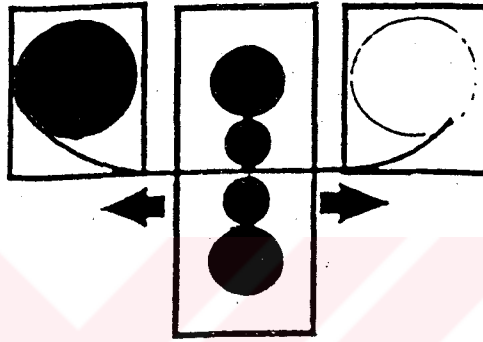
#### 4.1.3 Çelik Haddeleme Yöntemleri

Çelik haddelemede iki temel teknik uygulanır; sürekli haddeleme ve çevirme haddeleme;

Sürekli haddelemede slab, haddeleme sıcaklığına ısıtılarak bir dizi merdane arasında istenilen kalınlığa indirilir. Yüzeyde pullanma düşüktür ve boyutsal hassasiyet oldukça iyidir.



Şekil 4.3 Sürekli haddeleme

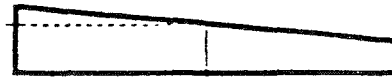


Şekil 4.4 Çevirme haddeleme

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi çevirme haddelemede tek bir merdane seti vardır. Malzeme ısıtılan iki hazne içerisinde rulo halinde sarılmakta ve merdaneler her bir geçişten sonra yaklaştırılarak kalınlıkta azalma elde edilmektedir. Çevirme haddelemenin tercih edilmesinin sebebi daha hızlı ayar değiştirme imkanı vermesidir. Çevirme haddelemede yüzeyde çok daha fazla pullanma gerçekleşir ve merdanelerin rijitliği sürekli haddeleme yöntemine göre daha düşük olduğundan boyutsal hassasiyet daha zor kontrol edilir.



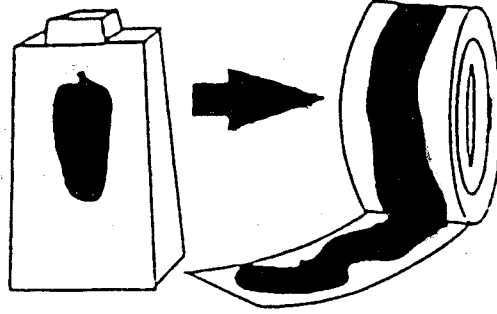
TAÇ FORM



KAMA FORM

Şekil 4.5 Hadde ayarındaki hatalardan dolayı oluşan et kalınlığı sapmaları

Merkezcil segragasyonlara sahip ingotun haddelenmesiyle bu mevcut segragasyonlar yayılarak segragasyon yüzey alanı daha büyük olan, merkezcil segragasyonlu bantı meydana getirirler.



Şekil 4.6 Merkezcil segragasyonların yayılması

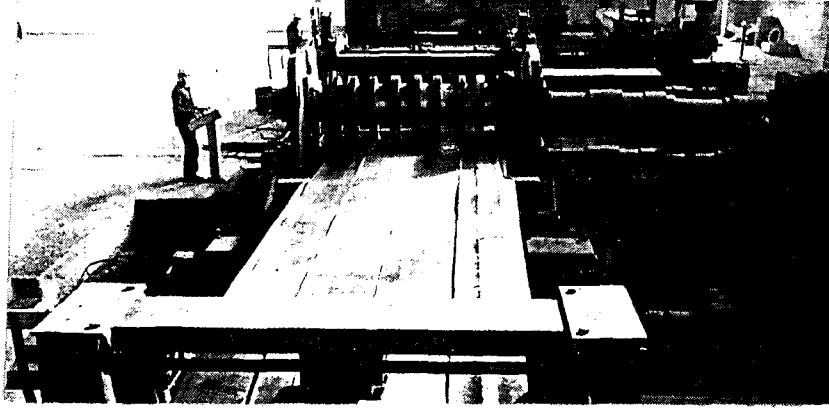
Sıcak haddelenmiş rulo bantlar genellikle sipariş üzerine istenilen kimyasal yapı, boyut ve tonajlarda imal edilmektedir.

Bant ağırlığı 8-20 ton arasında değişmekte, bant genişliğinin tespitinde ise imal edilecek boru için gerekli dilme ölçüsü ve dilme payları esas alınmaktadır. Yaygın olarak 1000-1500 mm arasındaki bant genişlikleri kullanılmaktadır.

#### 4.2 Bant Dilme

Bant dilme, sıcak haddelenmiş çelik rulonun, boru imalatındaki gerekli ölçülere getirilmesi için yapılan işlemdir. Bant dilme tezgahında, malzemenin kaynak hattına verilmeden önce istenilen ana ölçüye dilinmesi ve bant kenarlarının kaynak işlemi için yeterli doğruluk ve yüzey kalitesinde olması sağlanır. Bunun için rulo açılarak, istenilen ölçülere göre dizilmiş dairesel bıçakların arasında, makaslama kuvvetleri altında dilinir, kenarları kesilir ve tekrar sarılır. Kenar yüzey kalitesini doğrudan etkilediğinden dairesel dilme bıçaklarının sürekli olarak kontrolü yapılmalıdır.

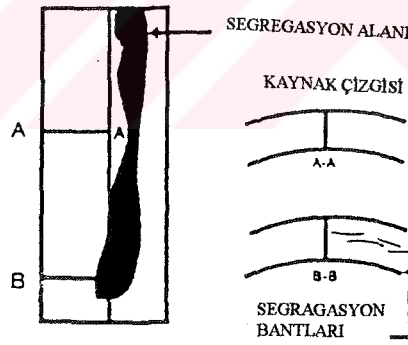
Kenar dilme payının artırılması ile elde edilen yüzey kaliteleri artmaktadır. Geniş kenar dilme payları ile çalışmak ilk bakışta maliyetleri artırır gibi gözükse de elde edilen kaliteli yüzeylerle, kaynaktaki fire oranı düşecek ve toplam maliyetler azalacaktır.



Şekil 4.7 Bant dilme işlemi

Uygulamada imal edilecek boru çapına, daha doğrusu çevresine göre hesap edilen bir dilme genişliği söz konusudur.

Büyük çaplar için bantın sadece kenar çapaklarının dilinmesi ile istenilen dilme genişliğine ulaşılırken, ufak çaplar için ise bant, kenar çapağının yanı sıra kimi zaman 4 hatta 5 ayrı parçaya kadar dilinebilir. Bu durumda ise bant ortasında kalan mevcut segregasyonlar dilme işleminden sonra yeni oluşan bantlarda kenar olarak karşımıza çıkar.



Şekil 4.8 Merkezci segregasyonların kenarda ortaya çıkması

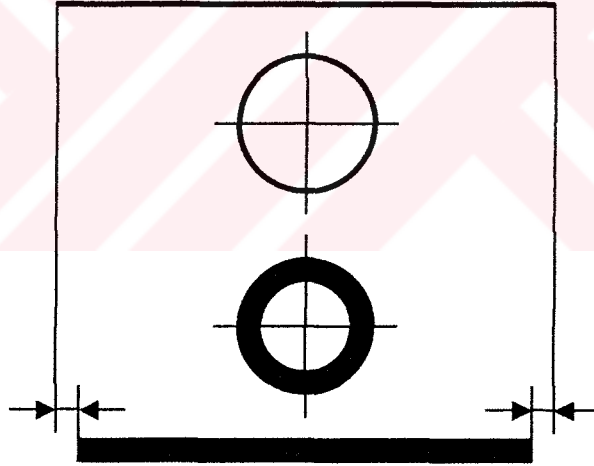
Her kaynak hattının imalatçısı tarafından hazırlanmış, imal edilecek boru ölçülerine karşın gelen bant genişlikleri tabloları mevcuttur. Kaynak esnasında operatörler binme miktarını kontrol ederler. Aynı boru çapında daha fazla binme uygulayabilmek için daha geniş bant ihtiyacı bulunduğundan, hat imalatçısının verdiği değerler ancak teorik bir yaklaşımdan ibarettir. Çoğu zaman sıkıştırma miktarının artırılması ile bir çok hatanın meydana gelmesi

önlenebilse de iyi bir kaynak kalitesi için uygun sıkıştırma miktarının tatbik edilmesi gereklidir. Daha fazla binme için daha geniş dilinmiş bant ihtiyacı vardır ve daha fazla binme, kaynak fitili olarak adlandırılan bağ düzleminden fişkırtilan malzemenin artması demektir bu da maliyetleri yükseltir.



Şekil 4.9 Hatalı bir dilme işlemi sonucu meydana gelen bant kenarı

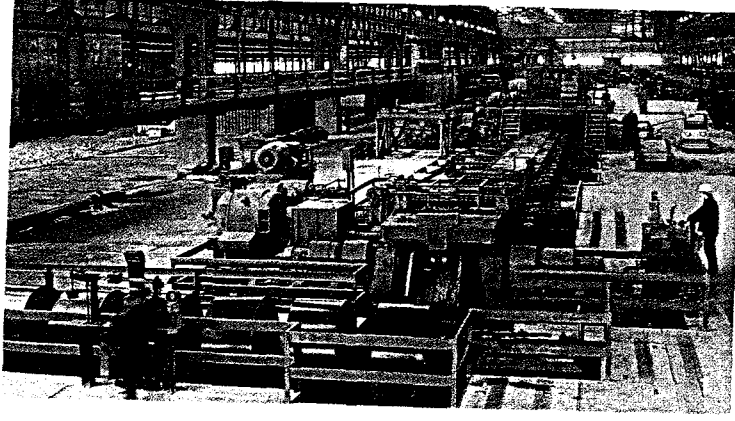
Bant boru formunda şekillendirilirken dış yüzeyler çekme, iç yüzeyler ise basma kuvvetleri altındadır. Bunun sonucunda tarafsız eksenin üstünde malzeme uzarken altında ise kısalmaktadır. Et kalınlığı fazla olan malzemelerde bu olay daha da belirgindir ve aynı dış çap ölçüsünde boru imalatı yapılırken et kalınlığı fazla olan boru için kullanılacak bant genişliği, et kalınlığı ince olan boru için gerekenden daha azdır. Şekil 4.10'da aynı boru çapı için kalın ve ince et kalınlığına göre ihtiyaç duyulan bant genişlikleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Dilme ölçüsünün malzeme et kalınlığıyla olan ilişkisi

### 4.3 Bant Açma

Bant açma tezgahında dilinmiş veya sadece hatta kenar kesmesi yapılacak bantlar, bant açma ünitesinden kaynak hattına alınır. Boru üretim prosesinin başlangıç noktası burasıdır. Bir önce hatta alınmış bant ile yeni verilen bantın kaynak edilebilmesi için, haddemenin doğasından gelen eğri bant ucunun kesilmesi de bu üniteye yapılır.



Şekil 4.11 Bant açma ünitesi

Hat çalışırken operatör bandın makaralar üzerinde doğrusal bir yol izlemesini kontrol eder.

6 mm'nin üzerindeki et kalınlıklarında bant eki yapılmaz. Bunun sebebi ek yerinin bandın sistemde ilerlemesi ve şekil alması esnasında maruz kaldığı yüksek çekme ve bükme kuvvetlerin, 6 mm kalınlık üzerinde, manuel elektrik ark kaynağı ile meydana getirilen dikişin kopmasına yol açması, daha da doğrusu bu kuvvetler altında kopmayacak bir dikişin manuel olarak yapılmasının çok fazla işçilik gerektirmesidir.

Bant açma ünitesi sonrasında kimi zaman bir ön muayene amacıyla bandın ultrasonik olarak laminasyon kontrolü yapılabilir.

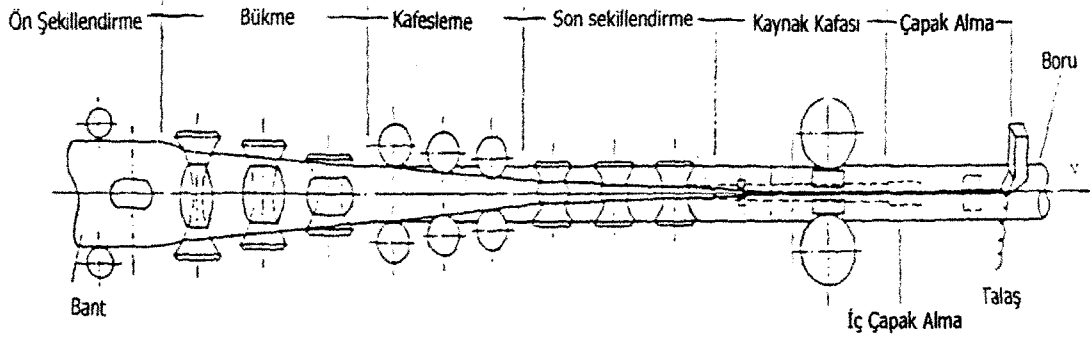
#### 4.3.1 Hatta Kenar Kesme

Nispeten büyük çap ve düşük et kalınlıklarındaki boru imalatında sadece bant kenarındaki çapakların alınabilmesi için hatta kenar kesme işlemi uygulanır. Prensipte olarak dilme tezgahında yapılan kenar kesmenin aynısıdır. Hatta ilerleyen bant kenar kesme ünitesine girer ve burada kenar çapakları dilinir. Dilinen kenarlar kırıcı olarak adlandırılan üniteye doğru yönlendirilir ve 15-20 cm'lik parçalara kesilirler.

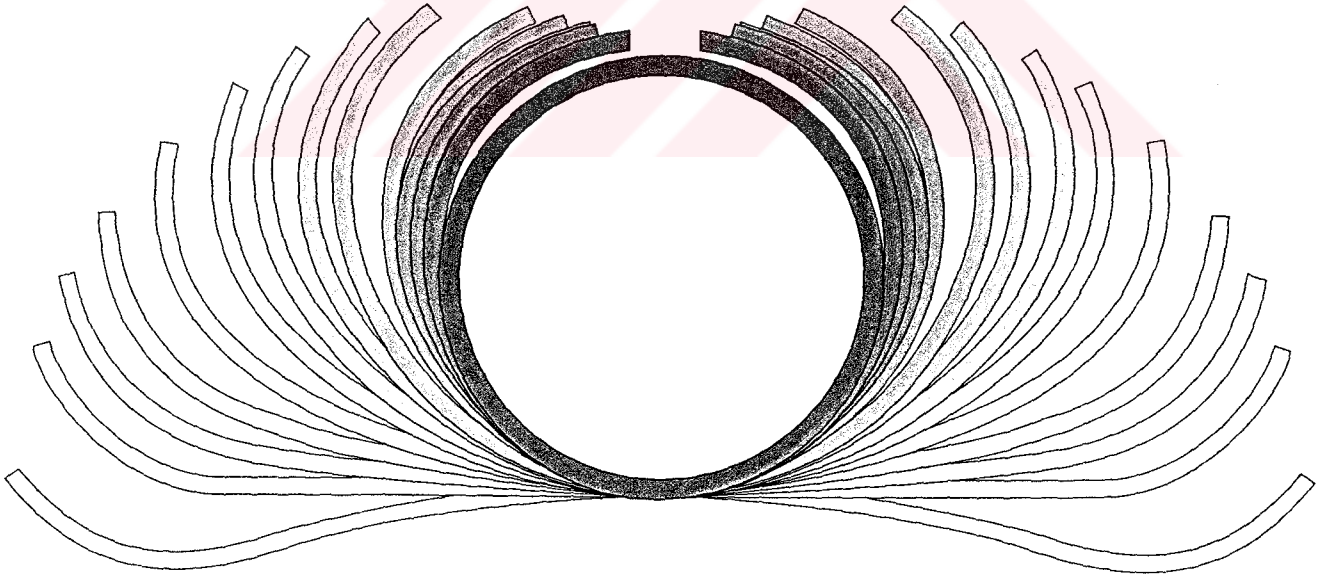
Hatta kenar kesme esnasında uygulanan büyük kuvvetler neticesinde meydana gelen titreşimler nihayi ürün kalitesine etki eder ayrıca kenar kesme tezgahı ile ilerisindeki şekillendirme ünitelerinin motor devir sayılarının senkronizasyonuna dikkat edilmelidir.

#### 4.4 Boru Formunun Verilmesi

Şekil 4.12'de boru üretim prosesinin şematik bir görünümü verilmiştir. Boru formunun verilmesi çelik boru imalatında en önemli ve karmaşık proseslerden birisidir. Hattın mekanik ayarlarının yapılması çok uzun sürer ve en ufak bir hata fire oranının artmasına yol açar.



Şekil 4.12 Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı boru üretim prosesi



Şekil 4.13 Ø 168,3 x 4 mm Boru formunun verilmesinin şematik görünümü

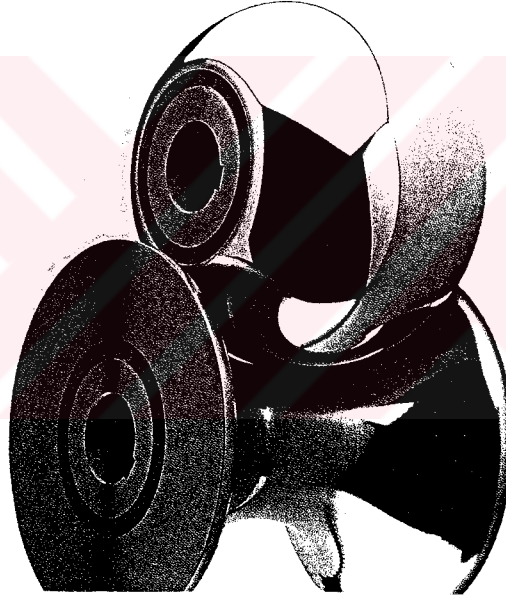
Merdaneler genellikle DIN 1.2379-1.2080-1.2344 malzeme kodlarıyla tanımlanan X155CrVMo121, X210Cr13 KU ve X40CrMoV51 takım çeliklerinden imal edilirler. İmalatı biten merdanelere sertleştirme ve sonrasında taşlama, parlatma işlemleri uygulanır.

Şekillendirme esnasında merdanelerin belirli bölgelerine sürekli olarak soğutma sıvısı püskürtülür. Soğutma sıvısı olarak genelde % 3'lük bor yağı emülsiyonu kullanılır.

Aşağıdaki bölümlerde plastik deformasyon ve malzeme mekanik davranışlarına girilmeden genel olarak malzemenin nasıl şekillendirildiği açıklanmıştır.

#### 4.4.1 Ön Bükme

Hat üzerinde ilerleyen malzemenin ilk şekillendirilmeye başlandığı kısımdır. Malzeme boyutlarına ve hat dizaynına bağlı olarak değişen adetlerde çift olarak yerleştirilmiş merdaneler arasından geçen bant kademeli olarak iç bükey bir form alır.



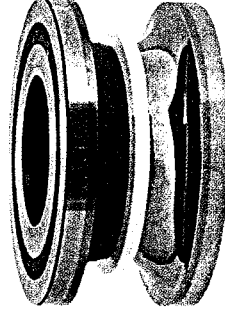
Şekil 4.14 Ön bükme merdanesi

#### 4.4.2 Kafesleme

İç bükey formu verilmiş olan malzeme kafesleme olarak adlandırılan bölümde, bir dizi makaradan oluşturulmuş bir sistemde şekillendirilir. Kafesleme sisteminde malzeme üzerinde bir çok noktaya temas eden ve her birinin kendi ayar imkanı bulunan makaralar mevcuttur. Kafesleme esnasında malzemedeki geri yaylanma kuvvetleri çok yüksektir.

#### 4.4.3 Fımpas

Fımpas grubu genel olarak 4'er merdaneli 4 setten oluşur. Fımpas grubu çıkışında açık boru formu dediğimiz form elde edilmiştir. Fımpas üst merdanelerinde bant kenarlarının birleşmesini engelleyecek bıçaklar vardır.



Şekil 4.15 Seramik bıçaklı fımpas merdanesi

#### 4.5 Kaynak

Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynağı yönteminde yüzey oksitlerinin tamamı ergimekte ve binme prosesi esnasında bağ düzleminden dışarı atılmaktadır. Bu olay sadece oksidinin ergime sıcaklığı ana malzemedeki düşük olan karbon çeliği gibi malzemelerde gerçekleşir. Ergime kontaktlardan verilen yüksek frekans akımının bant kenarlarından geçerken meydana getirdiği direnç etkisinde gerçekleşir. Bant kenarlarının kaynak merdaneleri arasından geçmesiyle birleşme sağlanır. Kaynak merdaneleri operatör tarafından baskı miktarını ayarlanacak şekilde kumanda edilebilirler.

##### 4.5.1 Temel Kavramlar ve Birleşmenin Analizi

Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynağının nasıl gerçekleştiğini daha detaylı görebilmemiz için basitleştirilmiş için üç boyutlu bir modeli çok kısa zaman aralıklarında incelemek faydalı olacaktır.

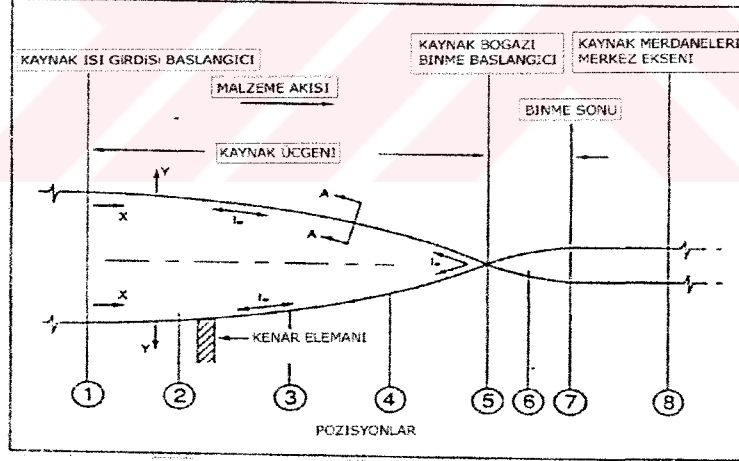
Kaynak prosesi önce kenarların ısıtılması ve daha sonra mekanik olarak bastırılması işlemleriyle gerçekleşmektedir. Isınma bölgesinin tersi yönündeki tüm aşamalar ısınmanın başlangıcına düzenli malzeme akışı gerçekleşmesi amacıyla yapılır. Isınma kaynak kontaktları ile bant kenarlarının ilk temas ettiği, kaynak üçgeni boğaz noktası arasında gerçekleşir. Gerçek birleşme ise kaynak boğazı ile kaynak merdaneleri merkez eksenini önündeki herhangi bir noktada meydana gelir.

İdealleştirilmiş bir işlemdeki birleşmeyi analiz edebilmek için aşağıdaki kabulleri yapmak gerekir;

- Malzeme hızı sabittir.
- Her iki kenardaki malzeme kalınlığı aynı ve sabittir.
- Malzeme elektriksel ve metalurjik özellikleri homojen dağılmıştır.
- Kaynak üçgeni içerisinde ısıtılan uzunluklar her iki kenarda da aynıdır.
- Kaynak üçgeni içerisinde bant kenarları her zaman paraleldir.
- Kaynak akımı sabittir.
- Kaynak üçgeni yükseklik ve genişliği sabittir.

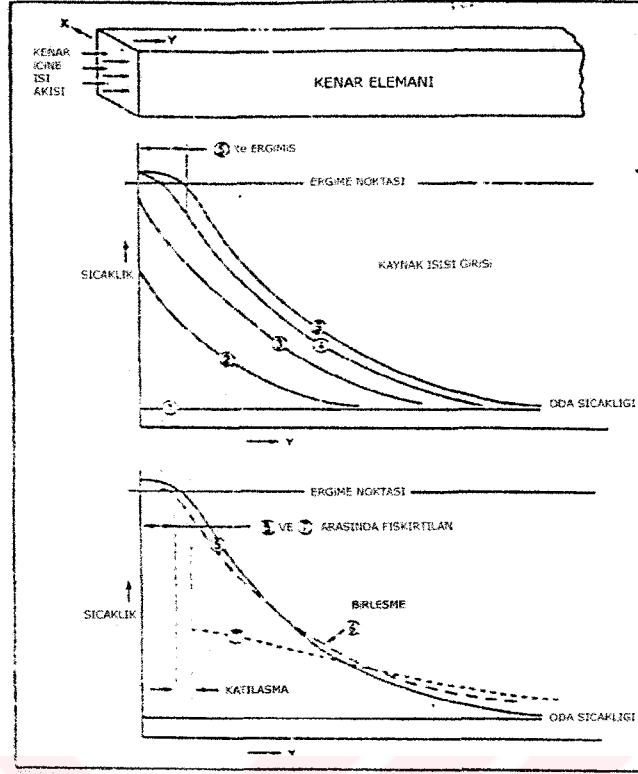
Daha da basite indirgemek için ek olarak şu kabuller de yapılmalıdır;

- Kaynak akımı frekansı sonsuzdur. İnce malzemeler ve çok yüksek üretim hızları dışında akım frekansının kaynak üçgeni içerisindeki bant kenarları sıcaklık dağılımına çok az bir etkisi olduğu matematiksel analizlerle de gösterilebilir.
- Malzemenin manyetik ve termik özellikleri sıcaklıkla değişmez
- Akım üniform olarak sadece birleşecek karşılıklı yüzeylerden akmaktadır. Et kalınlığı 4 mm'den düşük malzemelerde köşelerde gerçekleşen ısınma etkisi ihmal edilebilir.



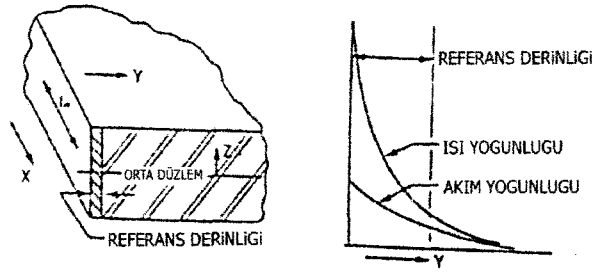
Şekil 4.16 Kaynak bölgesinin şematik görünümü

Şekil 4.16'da Kaynak bölgesi şematik olarak gösterilmiştir. Isınma pozisyon 1'de başlar ve kaynak boğazına doğru hareket eden bir eleman şeklinde pozisyon 5'de sona erer. 5-7 arasında yada bazı durumlarda kaynak merdaneleri merkez ekseni, 8'de binme meydana gelir.



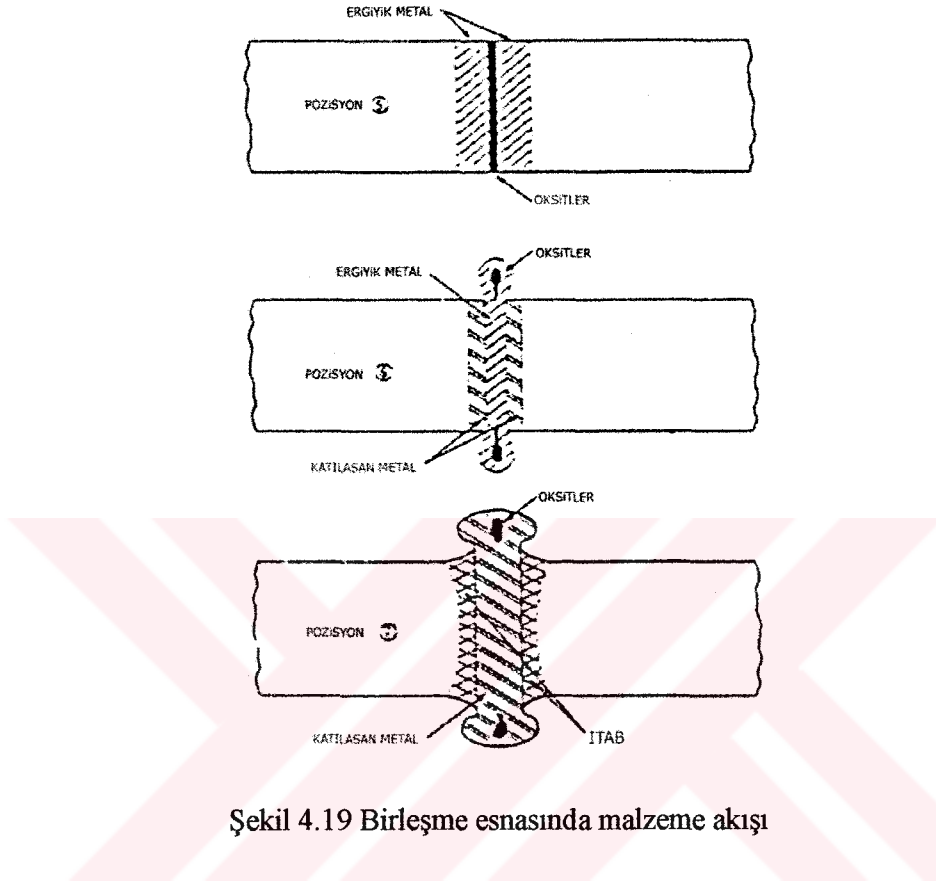
Şekil 4.17 Kaynak bölgesinde sıcaklık dağılımı

Isınma kaynak akımının ( $I_K$ ) kenar yüzeylerinde akması sonucu gerçekleşir. Gerçek işletme şartlarında kullanılan kaynak akım frekanslarında tabakadaki yüzey etkisinden dolayı akımın önemli bir kısmı referans derinliği olarak adlandırılan sıg bir tabakada akar. Bu tabaka içinde ise akım yüzeyde yoğunlaşmıştır. Akım etkisiyle kenarlarda gerçekleşen ısı gelişimi akımın karesi ( $I_K^2$ ) ile orantılıdır ve bu yüzden Şekil 4.18'de görüldüğü gibi yüzeylerdeki ısı yoğunluğu çok daha fazladır.



Şekil 4.18 Bant kenarında gerçekleşen akım ve ısı dağılımı

Kenar yüzeylerinden içeri doğru ısı akışıyla, Şekil 4.18’de gösterilen kenar elemanı pozisyon 1’den 8’e doğru ilerledikçe artan bir sıcaklık dağılımı geliştirir. Pozisyon 4 ile 5 arasında yüzeyden belirli bir derinlikte ergime gerçekleşir.

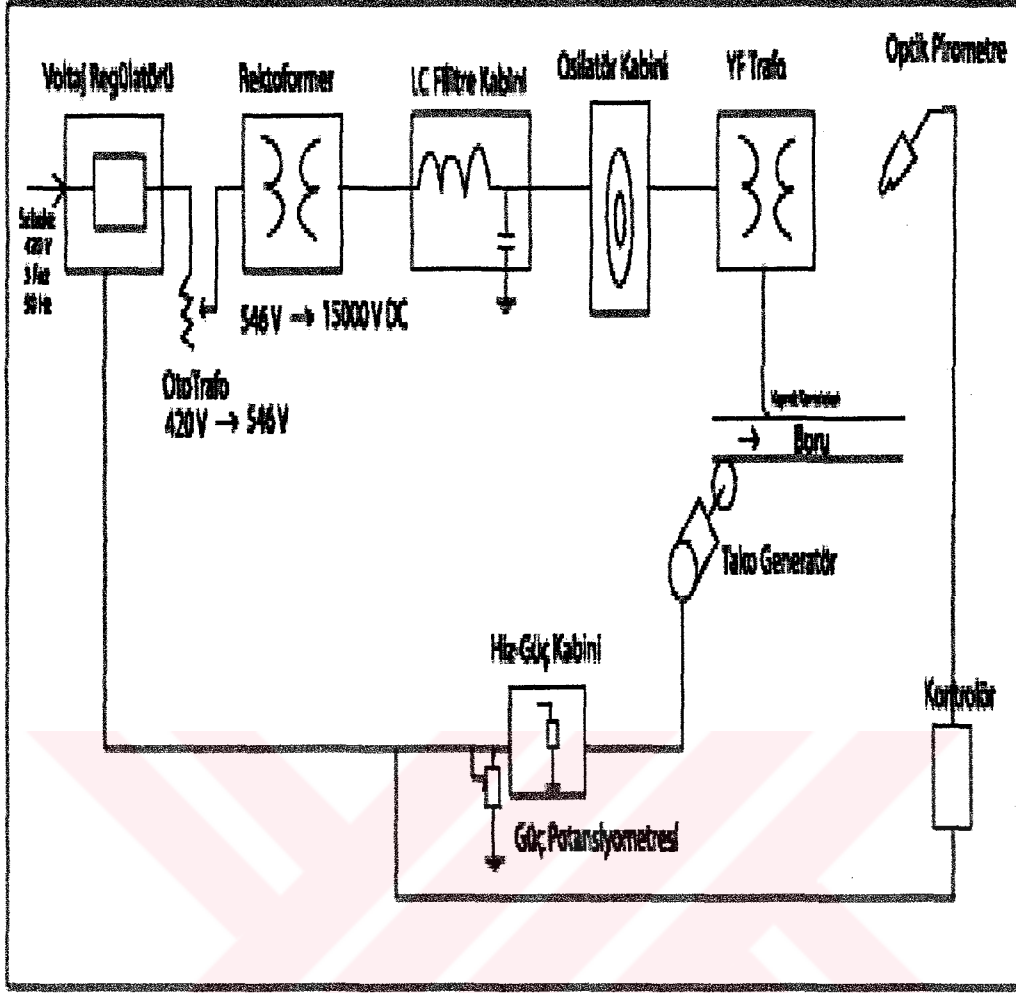


Şekil 4.19 Birleşme esnasında malzeme akışı

#### 4.5.2 Yüksek Frekans Akımının Oluşturulması ve Kontrolü

Yüksek frekans generatörü 50 Hz'daki düşük şebeke frekansını 200–500 kHz'deki yüksek kaynak frekansına dönüştüren ve akımı kaynak bölgesinde yoğunlaştıran bir sistemdir. Generatörden çekilen akım, kaynak üçgeni elektriksel empedansına, bu empedans ise kaynak üçgeni boyutlarına bağlıdır.

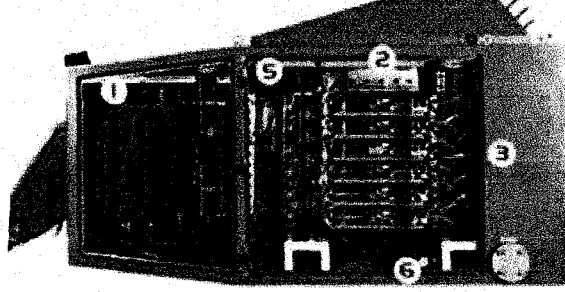
Vakum tip ve katı fazlı tip olmak üzere iki değişik yüksek frekans generatörü vardır. Katı fazlı generatörler transistörlü inverter kullanırlar. Katı fazlı generatörler yeni gelişmekte olan bir teknoloji ürünüdür ve yüksek verimle çalıştıklarından enerji giderlerinden tasarruf sağlarlar.



Şekil 4.20 Yüksek frekans sistemi prensip şeması

420 V, trifaz, 50 Hz değerlerindeki alternatif şebeke gerilimi voltaj regülatörüne girer. Voltaj regülatörü hattan gelen referans sinyale göre akım geçişini denetler. Voltaj regülatörü çıkışında 420 V'luk gerilim bir oto-trafo yardımıyla 546 V değerine çıkarılır. Oto-trafo çıkışında 546 V ve 50 Hz değerindeki alternatif gerilim rektoformer ünitesinde 15.000 V'luk doğru akıma dönüştürülür. LC filtresinde doğru akımdaki dalgalanmalar minimuma indirilir ve ardından osilatör kabininde frekans 400 kHz değerine çıkarılır. Osilatör ünitesi yüksek frekans trafosuna bağlıdır burada voltaj, sargı sayısına bağlı olarak yaklaşık 1:13 oranında düşürülür ve akım 550 A değerine çıkarılır. Sistemde kaynak sıcaklığı ve kaynak hızı geri

beslemeleri yapılır. Kaynak sıcaklığının bir optik pirometre yardımıyla ölçülen değeri kontrol ünitesinden geçerek voltaj regülatörüne döner. Hız ile ilgili referans ise bir tako generatör vasıtasıyla alınır ve önce hız-güç kabine girer daha sonra da güç potansiyometresinden geçerek voltaj regülatörüne döner.



Şekil 4.21 Yüksek frekans kaynak inverteri

Yüksek frekans kaynak inverterini oluşturan kısımlar ve görevleri aşağıda verilmiştir;

1. Otomatik Yük Adaptasyon Sistemi

Kaynak verimi arttırmak ve kaynak frekansını sabit tutmak için kullanılır.

2. Su Soğutmalı 50 kW'lık Modül Çiftleri

Modül probleminde toplam güç kaybını azaltmak ve bakım zamanını düşürmek.

3. Yüksek akım – Düşük Voltaj Dönüştürücü

400 kHz veya üzerindeki frekans değerlerini sağlamak

4. Kaynak Kontaktları

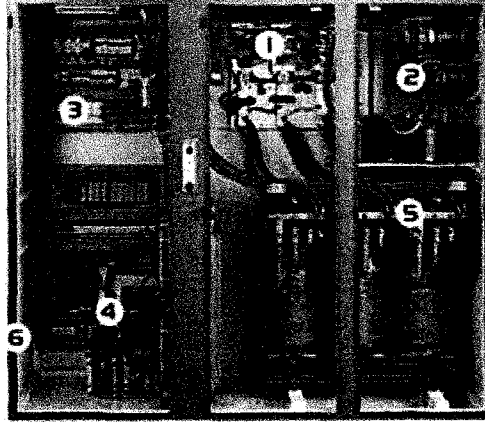
Yüksek frekans akımının bant kenarlarına iletilmesini sağlar.

5. Yüksek Frekans Yüksek Güç Kapasitörü

Yüksek gücün düşük voltajla ark atlaması yapmadan güvenli olarak dağıtılmasını sağlar.

6. İnverter Kasası

İnverteri dış etkilerden korumak için kullanılır.



Şekil 4.22 Doğru akım kaynağı

**1. Trisitör Güç Kontrol ve Sabitleme Ünitesi**

Sabit bir çıkış gücü elde edilmesini sağlar.

**2. Düşük Dalga Filtre Şebekesi**

Doğru akım dalgalanmalarını %1'den daha düşük bir seviyeye indirmekte kullanılır.

**3. PLC Ünitesi**

Kaynak işleminin kontrolünü sağlar. Performans ölçümü ve hata tespiti için kullanılır.

**4. Otomatik Hız ve Güç Kontrol Sistemi**

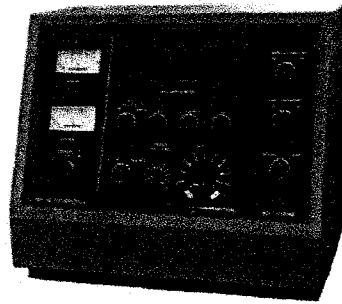
Hat hızındaki artış ve düşümlere göre kaynak gücünü ayarlar böylelikle hat ilk çalışma ve duruş esnasında ortaya çıkan kaynaklanmamış boru miktarını azaltır.

**5. Ağır İş Ana Güç Transformatörü**

Uzun ömür ve güvenli güç çıkışı sağlar.

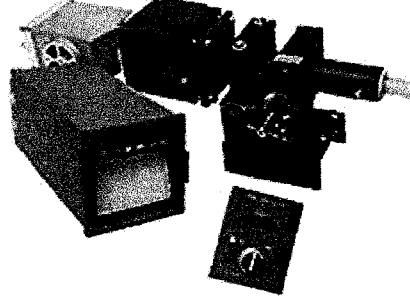
**6. Dış Kabin**

Doğru akım kaynağını dış etkilerden korumak için tüm elemanların yerleştirildiği kabindir.



Şekil 4.23 Operatör panosu

Operatör panosu tüm kaynak kontrollerinin ve alfa nümerik tespitlerin gösterildiği ünitedir.



Şekil 4.24 Otomatik kaynak kontrol sistemi elemanları

Kaynakta kalitenin sürekliliğini sağlamak için kullanılan otomatik kaynak kontrol sistemi temel olarak iki renkli optik pirometre ve kaynak sıcaklık değerlerinin kaydedildiği bir yazıcı üniteden oluşur. Kaynak bölgesinde meydana gelen duman ve buhardan dolayı normal pirometrelerle yapılan ölçümler sağlıklı değildir. Bu sistem güç ünitesiyle bağlanarak kaynak sıcaklığının belirli bir aralıkta tutulması sağlanabileceği gibi kaynak sıcaklığının sürekli olarak görüntülenmesiyle operatörün gerekli müdahaleleri yapması sağlanabilir.

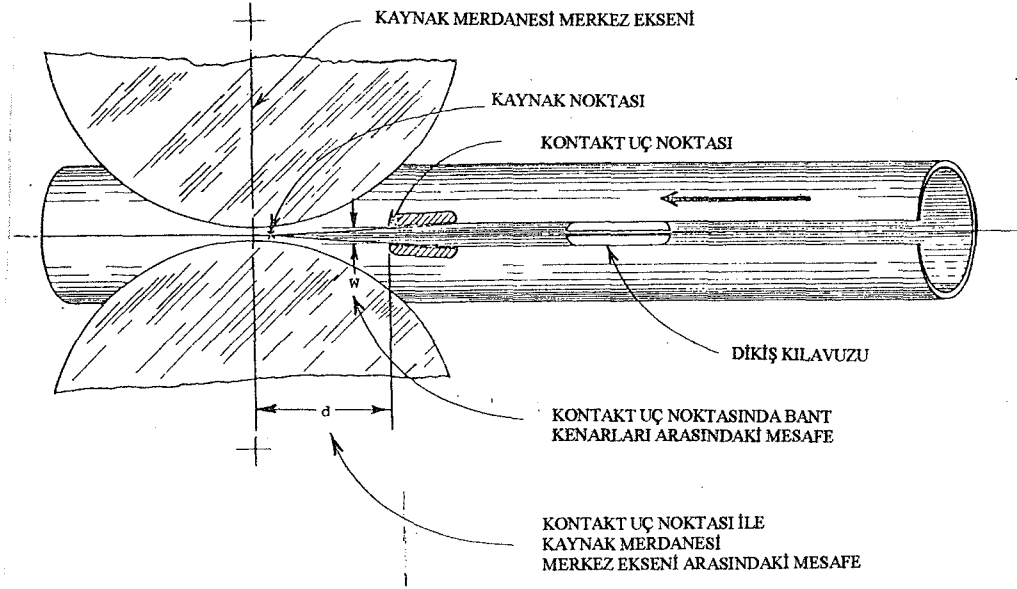
#### 4.5.3 Kaynak Akımının İletilmesi

Generatörde üretilen yüksek frekans akımı Şekil 4.25’de görüldüğü gibi kaynak noktasının biraz önünde, kontaklar tarafından bant kenarlarına verilirler. Akım bir kenardan diğerine kaynak üçgeni olarak adlandırılan bölgeyi dolanarak geçer. Kaynak üçgeni içerisinde yüzey ve yaklaşma etkilerinden dolayı akım yoğunluğu çok yüksektir ve bant kenarları, boğaz noktasında kaynak sıcaklığında olacak şekilde ergir.

Kaynak hızı, kaynak üçgeni içerisinde meydana gelen ısının kondüksiyonla borunun daha soğuk kısımlarına yayılmasını engelleyecek kadar yüksektir. Buna rağmen uygulamada

6 m/dak hıza kadar inilebilir (Thermatool, 1991).

Bant kenarları kaynak merdaneleri eksenine gelmeden önce temas ederek kaynak boğazını oluştururlar. Kaynak üçgeni olarak adlandırılan kısım yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynağındaki en önemli bölgedir.



Şekil 4.25 Kaynak akımının iletilmesi

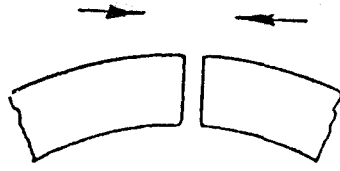
#### 4.5.3.1 Kaynak Boğazının Kaynak Noktasına Olan Mesafesi

Bant kenarlarının birbirlerine temas ettikleri nokta, kaynak merdaneleri merkez ekseninin belirli bir miktar önündedir. Bunun sebebi kaynak esnasında ergiyen malzemenin dışarı fişkırtılması gerekliliğidir. Bu noktada elektriksel devre tamamlanır ve bandın bir kenarından akan yüksek frekans akımı diğer kenardan geriye döner ve bu dönüş noktasının önündeki malzemede daha fazla ısınma yapılamadığı için ani olarak soğuma gerçekleşir. Bu yüzden kaynak üçgeni boğaz noktası kaynak merdaneleri merkez eksenine ne kadar yakın tutulursa o kadar kaliteli bir kaynak elde edilir.

Temas noktasında sıcaklık en üst değerde olduğu için soğuma oranı da en yüksek değerindedir. Temas noktasını kaynak noktasına yakın tutmak amacıyla kaynak üçgeni tepe açısı mümkün olduğunca büyük tutulur.

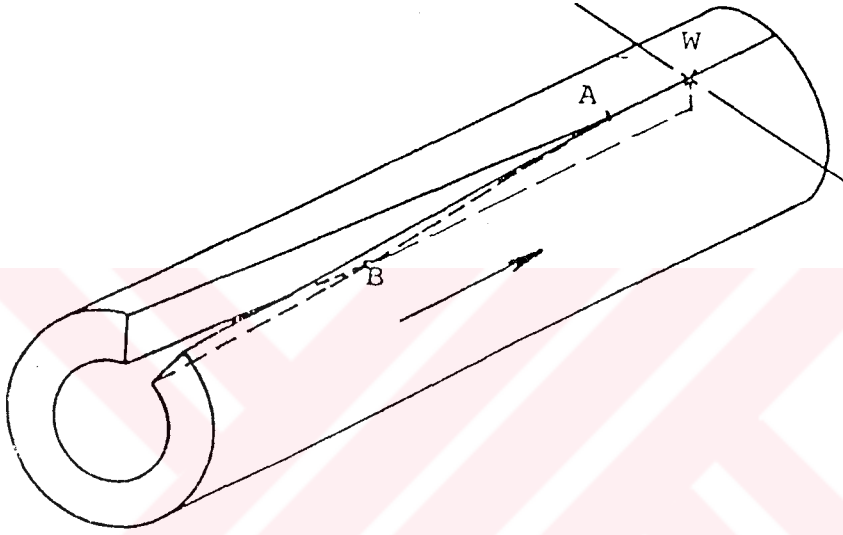
#### 4.5.3.2 Bant Kenarlarının Durumu

Bant kenarları kontrollü bir dilme işleminin uygulanmasıyla iyi bir yüzey kalitesinde elde edilmeli ve kaynak üçgeni içerisine Şekil 4.26'da görüldüğü gibi paralel ve düşey düzlemde açı yapmadan girmelidir. Ayrıca paralel kenarların meydana gelen karşı kuvvetleri azalttığı unutulmamalıdır.



Şekil 4.26 Bant kenarlarının kaynak bölgesine yönlendiği

Kenarların paralelliği sağlanamazsa çift kaynak üçgeni denilen durum meydana gelir. Şekil 4.27'de temas noktaları A ve B olarak tanımlanmış çift kaynak üçgeni oluşumu görülmektedir.



Şekil 4.27 Çift kaynak üçgeni oluşumu

Çift kaynak üçgeni oluşması durumunda yüksek frekans akımı daha kısa olan yolu tercih ederek B noktasından geri dönecektir.

Kenarların paralelliği sağlandığında, ısı dağılımı Şekil 4.28'de görüldüğü gibi homojen olur.



Şekil 4.28 Bant kenarlarında homojen ısı dağılımı

Kenarlar paralel olarak kaynak üçgeni içine yönlense, ısı dağılımı Şekil 4.29'da görüldüğü gibi gerçekleşir.



Şekil 4.29 Paralel yönlendirilmemiş kenarlarda ısı dağılımı

Şekil 4.29'da gösterilen durumda kaynağın dış kısımlarda da gerçekleşebilmesi için ısı miktarının artırılması gerekecek fakat bu durumda da iç kısımlar aşırı ergiyerek akma eğilimi göstereceklerdir.

Bant kenarları paralel olarak birleştirildiklerinde ergime esnasında meydana gelmiş oksitler, borunun hem iç çap hem de dış çap doğrultusunda dışarı fıskırılabilirlerdir. Bu ideal durumdur ve oksitlerin dışarı atılması için ilerleyecekleri yol, boru et kalınlığının yarısından fazla olamaz.

Ayrıca bant kenarlarının iç kısımda daha önce temas etmesi dış kısımlarda yetersiz ergime gerçekleşmesine yol açar ve meydana gelen oksitler buradan dışarı atılamazlar.

Çift kaynak üçgeni oluşumunda, Şekil 4.27'de görüldüğü gibi birleşme B noktasında tamamlanacak ve bu nokta kaynak merdanelerine gelene kadar A noktasındaki temasa göre daha fazla süre geçmiş olacaktır bu durumdaki soğuma da daha fazladır. Bu yüzden paralel kenarların kaynak süresini azalttığı söylenebilir.

#### 4.5.3.3 Dikiş Kılavuzu

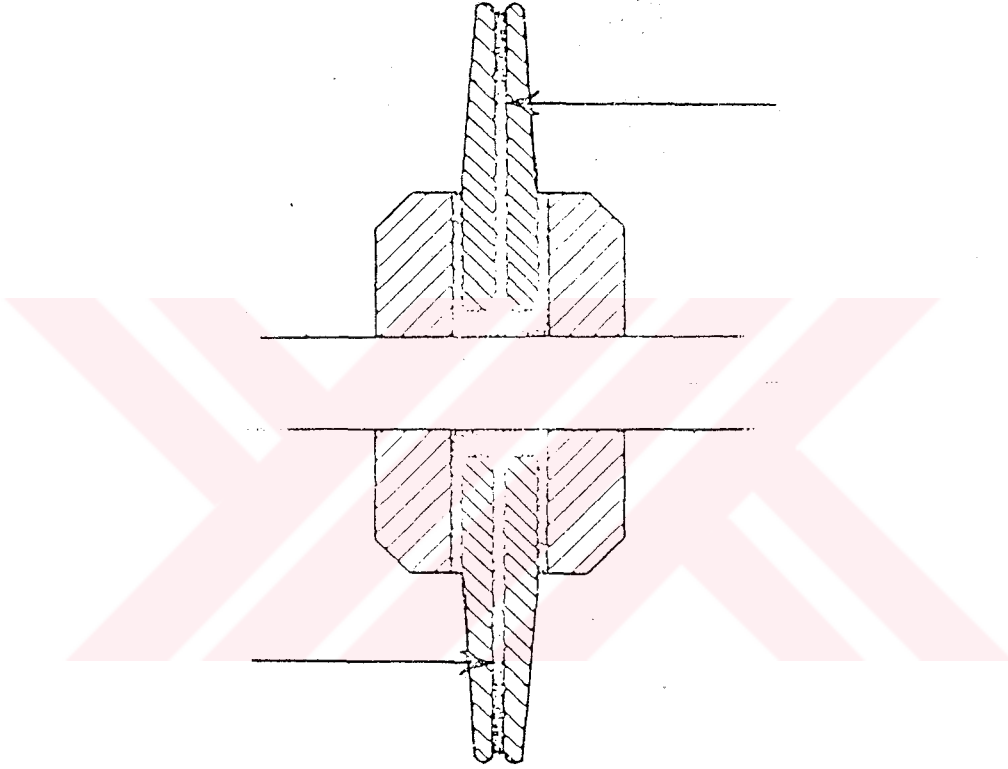
Bant kenarlarının kaynak bölgesine yönlendirmesinin öneminden bir önceki bölümde bahsedilmişti. Şekillendirme ve kaynak merdaneleri boru formunun oluşturulması ve korunmasında görev alırlar ama borunun kendi ekseninde dönmesini tam olarak önleyemezler. Bant kenarlarının kaynak bölgesine belirli bir eksen üzerinde simetrik olarak girebilmesi ve kaynak üçgeni açısının korunabilmesi için dikiş kılavuzu olarak adlandırılan bir sistemin kullanılması gereklidir.

Dikiş kılavuzu adından da anlaşıldığı gibi sadece dikiş kılavuzlama görevi yapmadır. Hat mekanik ayarları doğru yapılmışsa finpas merdaneleri çıkışında istenilen açık boru formu

verilmiş olacağından, bant kenarlarının dikiş kılavuzunu üzerine aşırı baskı oluşturmaması beklenir.

Bir çok değişik tip dikiş kılavuzu bulunmasına karşın, çelik malzemelerin kaynağında Şekil 4.30'da gösterilen tekli döner tip kılavuzlar kullanılır. Dikiş kılavuzları çelik malzemedir, çift parçalı olarak imal edilirler ve kontaklardan verilen yüksek frekans akımının kısa devre yapmaması için parçalar arasında mutlaka izolasyon malzemesi bulunur.

Genellikle döner dikiş kılavuzunun ilerisinde dikey şaftlı bir çift yanal merdane koymak gereklidir. Bu merdanelerin görevi şekillendirme olmayıp boruya kılavuzluk etmektir.



Şekil 4.30 Döner tip dikiş kılavuzu

#### 4.5.3.4 Kaynak Kontaktları

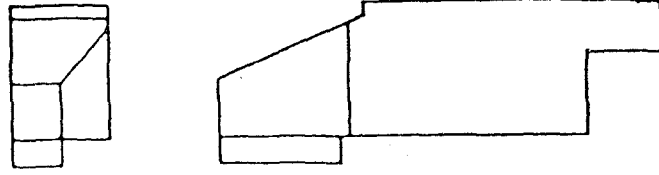
Temel olarak kaynak kontaktları gövdesinde soğutma kanalları olan bakır parçalardır ve görevleri yüksek frekans akımını kaynak bölgesine iletmektir. Kontaktlar sekonder bağlantılara civatalar veya adaptörlerle bağlanırlar.

##### 4.5.3.4.1 Kontakt Uç Dizayını

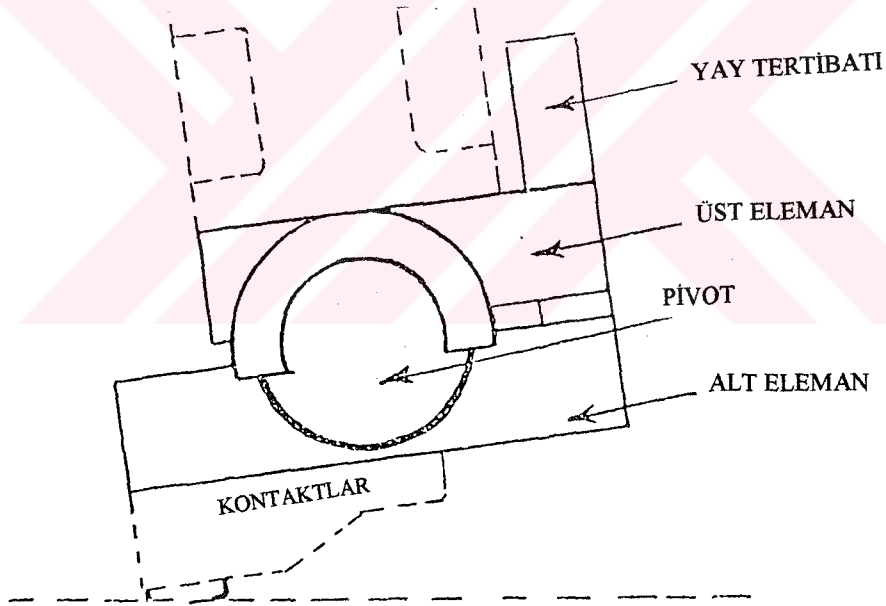
Kontakt uç malzemeleri boruya verilecek yüksek akım ve kaynak yapılacak malzeme mukavemet değerleri göz önünde tutularak seçilirler. Kontakt uçları kontakt gövdesine

lehimlenerek bağlanırlar. Sıcak haddelenmiş çelik saçların kaynağında kullanılan kontakt uçları, bakır ve tungsten-karbür alaşımı malzemelerden imal edilirler.

Kontakt uçları dikdörtgen kesitli imal edilirler ve küçük çaplı borularda kontakt eni, boru arkasına kaçacak akımı engellemek için oldukça dar tutulur. Büyük çaplı borularda ise baskı alanı genişletilerek kontakt ucunda deformasyonun önlenmesine çalışılır ve nispeten geniş uçlar kullanılır.



Şekil 4.31 Çelik malzemelerin kaynağında kullanılan burunlu tip kontakt

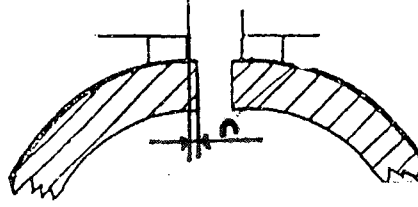


Şekil 4.32 Kontakt yay tertibatı

Şekil 4.32'de görüldüğü gibi bir yay tertibatıyla, boru yüzeylerindeki olası düzensizlikler karşısında kontakt temasının kesilmesi önlenmeye çalışılır.

#### 4.5.3.4.2 Kontakların Boruya Teması

Kontaklar boru üzerinde Şekil 4.33’de görüldüğü gibi merkezlenerek yerleştirilmelidirler.

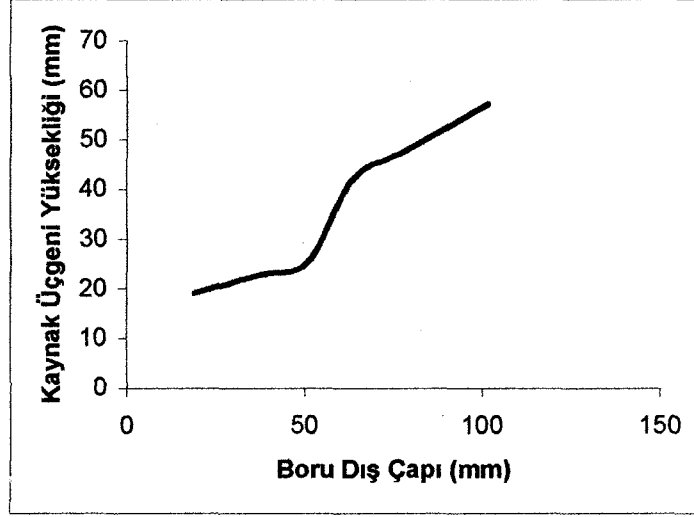


Şekil 4.33 Kontakların boruya teması

n mesafesi 50 mm dış çapa kadar olan borularda 0,38 mm, daha büyük borularda ise 0,76 mm olarak seçilmelidir. Kontakt ucunun boru içine taşma yapması aşırı bölgesel ısınmaya yol açabilir (Thermatool Corporation, 1991).

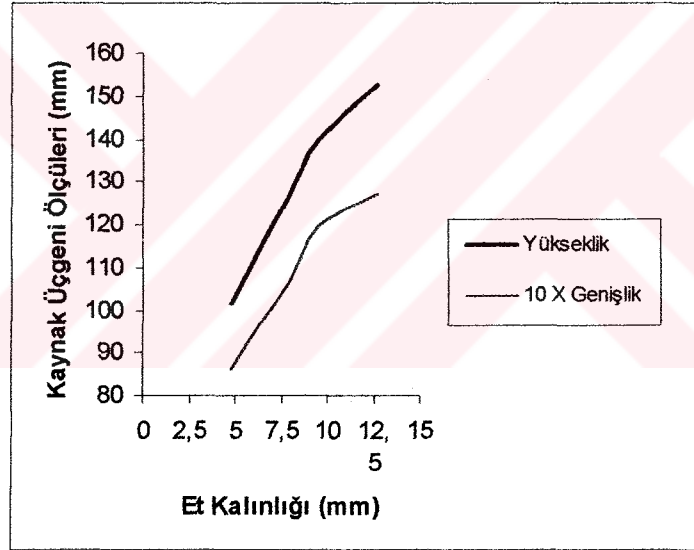
#### 4.5.3.4.3 Kontakt Temas Noktası İle Kaynak Merdaneleri Merkez Eksenini Arasındaki Mesafenin Belirlenmesi

Teorik olarak bakıldığında, dik bir ısı gradyanı elde etmek ve böylelikle kaynak esnasında yüksek arayüzey basınçlarına ulaşabilmek için kaynak üçgeni yüksekliğinin mümkün olan en küçük değerde tutulması gerekir. Pratikte ise bazı sınırlamalar mevcuttur. Kaynak bölgesi empedansı güç kaynağıyla mantıksal bir ilişkide olmalıdır. Kalın malzemelerde bant kenarları merkezinde yeterli ısınmanın oluşabilmesi ve bunun için gerekli olan ısının kondüksiyonla bant yüzeyinden merkeze ulaşabilmesini sağlamak için kaynak üçgeni yüksekliğini uzun tutmak gerekebilir. Kaynak üçgeni yüksekliğinin alt sınırını ise kaynak merdaneleri belirlemektedir.



Şekil 4.34 Boru dış çapı ile kaynak üçgeni yüksekliğinin değişimi (Bell, 1993)

100 mm dış çapın üzerinde kaynak üçgeni ölçüleri sadece malzeme et kalınlığı ve kaynak çıkış gücü ile değişmektedir (Bell, 1993)



Şekil 4.35 Kaynak üçgeni ölçülerinin et kalınlığına göre değişimi (Bell, 1993)

#### 4.5.3.4.4 Uç Eğim Açısı

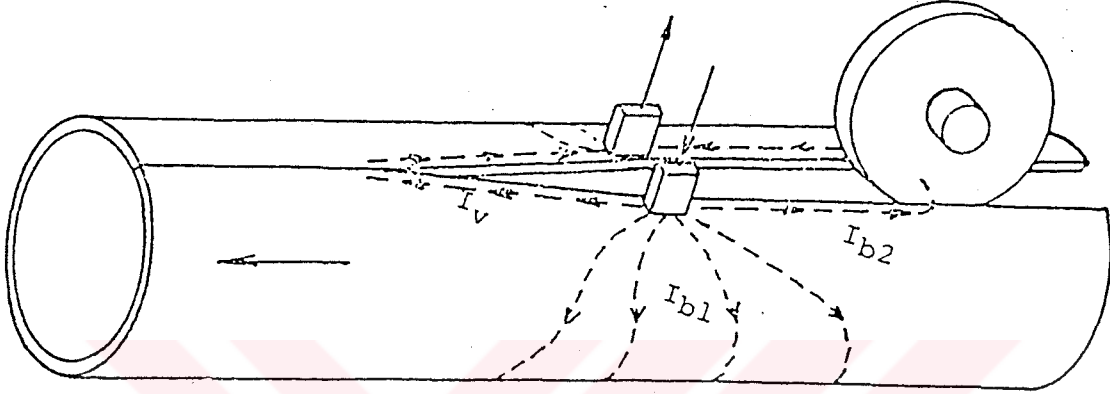
Kontakt uçlarının ön tarafları boruya önce temas edecek şekilde eğimli monte edilmelidir. Uçların yatay olarak temasında akım transfer noktası ileri geri hareket eder böylece kaynak üçgeninin efektif uzunluğu sabit kalmaz.

Kontakt uçlarını eğmenin diğer bir amacı ise uçların arkalarında tufal veya diğer malzemelerin toplanmasını önlemektir. Bu malzemelerin kontakt arkasında birikerek kısa

devre yapma ve kaynak üçgeni içerisine düşerek kaynakta hata oluşturma ihtimali vardır. Uygulamada eğim açısı yaklaşık  $5^\circ$  olarak alınır (Thermatool Corporation, 1991).

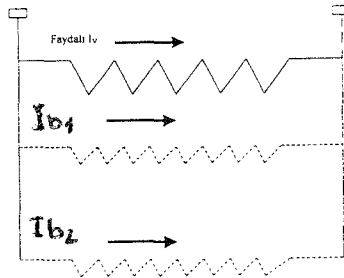
#### 4.5.3.5 Yüksek Frekans Akımının İzlediği Elektriksel Yollar

Yüksek frekans elektrik direnç kaynağında, kaynak kontaktları arasındaki elektriksel devre üç paralel yoldan oluşmuştur.



Şekil 4.36 Yüksek frekans akımının boruda izlediği elektriksel yollar

- Kaynak üçgeni içerisindeki faydalı akım ( $I_v$ )
- Boru etrafındaki faydasız akım ( $I_{b1}$ )
- Hat veya izole edilmemiş kılavuz arasındaki faydasız akım ( $I_{b2}$ )

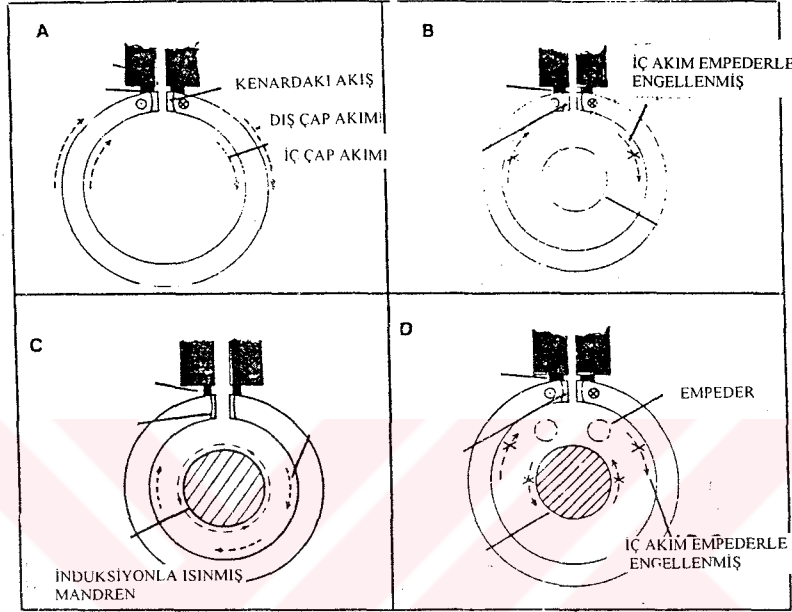


Şekil 4.37 Elektriksel akımlar

Paralel faydasız akımların çok düşük değerlere indirilerek kaynak işleminin veriminin yükseltilmesi mümkündür.

#### 4.5.4 Empederler

Kaynak esnasında akımın geçebileceği elektriksel yollar gösterilmiştir. Ortaya çıkan kaçak akımların önlenmesi için ise empederler kullanılır.



Şekil 4.38 Empeder uygulamaları

Empeder, boru arkasındaki yolun reaktansını yükselterek buraya akan yüksek frekans akımlarını azaltan, su soğutmalı manyetik çekirdekler içerir.

Her ne kadar yüksek frekans akımı daha düşük indüktansa sahip yolu tercih etse de, bir miktar akım, indüktansı daha yüksek ve kaynak üçgenine göre daha uzun olan, boru iç çap çevresinde dolanarak devreyi tamamlar.

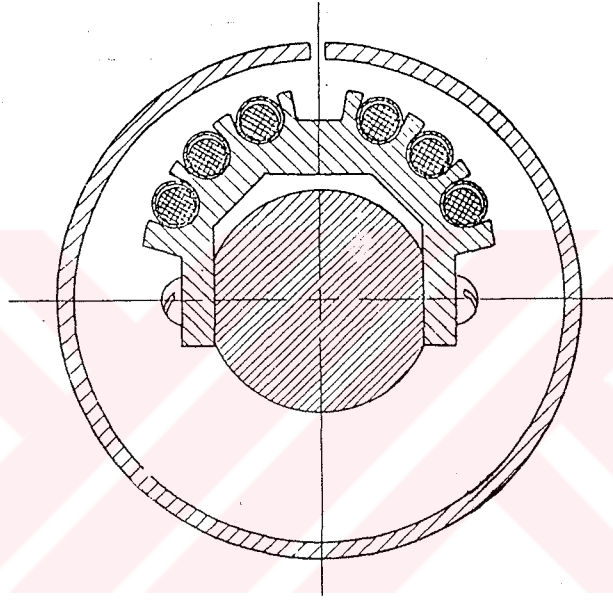
Yüksek indüktanslı bir uzun yol da boru dış çap çevresinde vardır fakat 15 mm dış çaptan daha düşük borular haricinde bu yolun pratik bir önemi yoktur (Hubbard, 1980).

İndüktans elektriksel yolun uzamasıyla arttığından boru çapının artmasıyla beraber iç ve dış çap çevresinde akan akım azalmaktadır. İç çap çevresinde akan akım 150 mm dış çapın üzerindeki borularda ihmal edilebilir. 150 mm dış çapın altındaki borularda boru içerisine empeder yerleştirilerek iç çap çevresinde akan akım azaltılır (Hubbard, 1980).

Empederler, iç çap elektriksel yolundaki indüktansı, akım pratik olarak gözden kaybolana kadar arttıran ve akımın istenildiği gibi kaynak üçgeni içerisinde yoğunlaşmasını sağlayan, yüksek manyetik geçirgenlik ve elektriksel dirence sahip, ferrit çubuklardan imal edilirler.

Empederler histerisizden dolayı ısınırlar. Ferrit çubukların sıcaklığı Curie noktasına ulaştığında manyetik özellikler azalır. Bu yüzden empederler mutlaka soğutulmalı ve çalışma esnasında sıcaklıkları 370 °C'nin altında tutulmalıdır.

Curie noktasının üzerinde kaybolan manyetik özellikler malzeme soğuduğu zaman tekrar geri kazanılır. Bu olay empederin yeterli soğutulmadığı kaynak işlemlerinde, empederin soğumasına yetecek süredeki duruşlardan sonra yapılan kaynakta, problemlerin bir süre ortadan kaybolmasına yol açar.



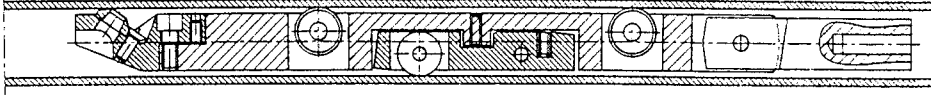
Şekil 4.39 Empederin boru içerisinde yerleştirilmesi

İstenilen faydayı sağlaması için empederler kaynak merdaneleri merkez ekseninin 3-6 mm ilerisine kadar uzanmalıdır (Bell,1993).

#### 4.6 İç Kazıma

Kaynak bağ düzleminden boru iç ve dış çapı doğrultusunda fişkırtılan ergiyik haldeki metal ve oksitler, ani soğumanın etkisinde katılarak, kaynak dikişi üzerinde kaynak fitili olarak adlandırılan sürekli tabakaları meydana getirirler. Boru formun oluşması için bu tabakaların kazınması gereklidir.

Boru iç çap doğrultusunda meydana gelen kaynak fitilinin alınması için, düşey hareketi hidrolik olarak kontrol edilen bir iç kazıma aparatı üzerine yerleştirilmiş dairesel bıçaklardan faydalanılır. Şekil 4.40’da iç kazıma aparatının şematik resmi gösterilmiştir.

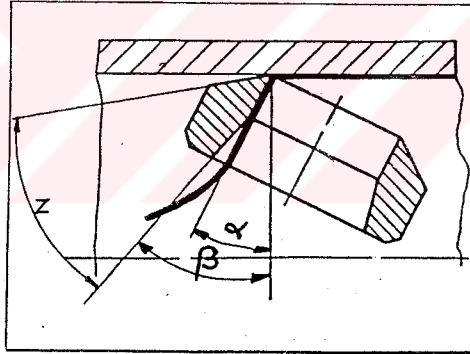


Şekil 4.40 İç kazıma aparatı

İç kazıma bıçakları genellikle tungsten-karbür malzemeden imal edilirler.

Hat yürümeye başladığında iç kazıma bıçağını taşıyan aparat yukarı doğru hareket ettirilerek bıçağın uygun derinlikte dalması sağlanır. Bıçağın fazla dalması tolerans dışı derin kazımaya, yetersiz dalması ise kaynak fitilinin tamamen kazınmamasına yol açar.

Borunu hareketi ile kazınan kaynak fitili dairesel bıçak ortasındaki boşluktan geçerek çoğu zaman hiç kopmadan boru içerisinde kalır. İç kazıma bıçağı temas ettiğinde kaynak fitili sıcaklığı hala çok yüksek ve görünüş kor halindedir. Böylelikle iç kazıma bıçağının fitili borudan ayırması oldukça kolay olmaktadır.



Şekil 4.41 İç kazıma işleminde meydana gelen açılar (Borger,1993)

Uygulamada en çok karşılaşılan sorunlardan birisi iç kazıma bıçağının kırılması sonucu iç fitilin alınmamasıdır. Bu durum tespit edildiği zaman hat durdurularak bıçak daha doğrusu temas yüzeyi değiştirilmelidir.

Operatörün iç kazıma prosesini görme şansı olmadığından eğer daha önce bir muayene yöntemi uygulanmıyorsa, iç fitilin kazınmadığı ancak, yaklaşık uzunluğu 60 m olan serbest soğuma bölgesi ilerisindeki Eddy akımları ile yapılan muayenede tespit edilebilir.

Bu durumda yaklaşık 60 m boruda dairesel iç taşlama yöntemiyle fitilinin alınması gibi çok büyük işçilik gerektiren bir uygulama yapılması gerekecektir.

İç kazıma işleminin bir kamera yardımıyla izlendiği sistemler geliştirilmiştir. Bu operatöre zamanında müdahale imkanı verir

Çizelge 4.5 Et kalınlığı toleransları (TS 1997)

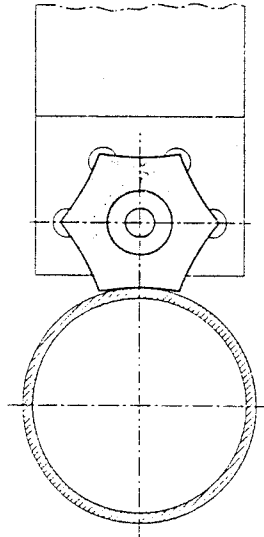
Boru Et Kalınlığı (t) ( mm )	Toleranslar ( mm )
$t \leq 3$	+ 0,30 - 0,25
$3 < t \leq 10$	+ 0,45 - 0,30
$t > 10$	+ 0,60 - 0,50

#### 4.7 Dış Kazıma

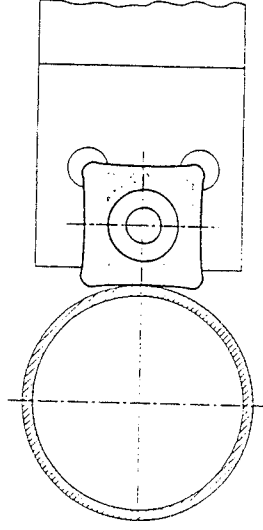
Dış kazıma, iç kazımayla benzer bir prosestir. Dış çap üzerinde oluşan kaynak fitilinin kazanmasında iç bükey kesme takımları kullanılır.

Dış kazıma aparatı düşey hareketi vidalı sistemle sağlanan bir takım taşıyıcı ve kesici takımdan oluşur.

Dış kazıma işlemi de kaynaktan hemen sonra malzeme sıcaklığı gözle görülecek derecede yüksekken yapılır. Bıçağın yapacağı dalma operatör tarafından kontrol edilir.

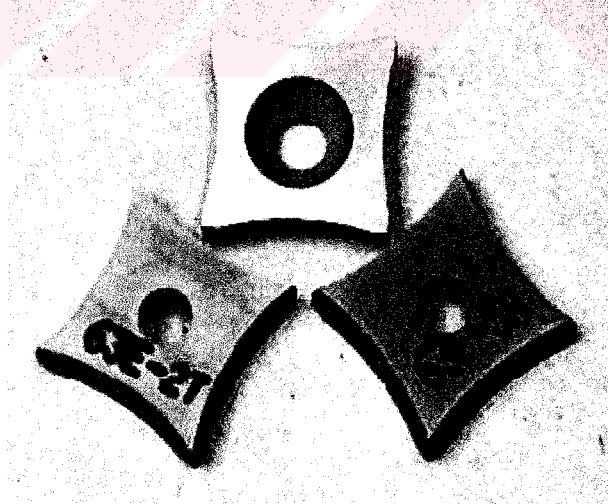


Şekil 4.42 Dış kazıma bıçağı (TİP A)



Şekil 4.43 Dış kazıma bıçağı (TİP B)

Tip A genellikle 75 mm dış çapa kadar borularda, tip B ise 75 mm'den daha büyük çaplı borularda kullanılır.



Şekil 4.44 Tip B dış kazıma bıçağı

#### 4.8 Tavlama

Kaynak sonrasında meydana gelen martenzitik yapının giderilmesi ve büyüyen tanelerin inceltilebilmesi için dış kazıma prosesinin hemen sonrasında dikiş normalizasyonu olarak adlandırılan ısıtma işleminin uygulanması gereklidir.

Bu işlemin uygulanmaması ancak çok düşük basınçlarda çalışacak borularda, müşteri talepleri doğrultusunda maliyetleri düşürmek amacıyla olabilir.

Dikiş normalizasyonu kaynak bölgesini tav sıcaklığına ısıtmak için doğrusal indüksiyon sistemini kullanan bir prosestir. Dikiş normalizatörü, kaynak prosesi sonrasında boruda kalan ısıdan faydalanmak için hat üzerinde kaynak ünitesinin hemen ilerisinde yerleştirilir. Dikiş normalizasyonundaki yöntem kaynak bölgesi ve ITAB'ın kristal yapısının ferritikten östenitiğe dönüşmesi için indüktörlerle yapılan ısıtmadır.

Kristal yapıdaki dönüşümler kaynak esnasındaki dönüşümlerle benzer olsa da normalizasyon işleminde iki temel fark vardır;

- a) Isımın kenardan bağ düzlemine doğru değil, dış çaptan iç çapa doğru tüm ITAB ve kaynak bölgesini tarayarak geçmesi
- b) Yeniden ısıtılmış bölgenin martenzit oluşumunun önlenmesi için yeterli bir süre boyunca serbest soğumaya bırakılması

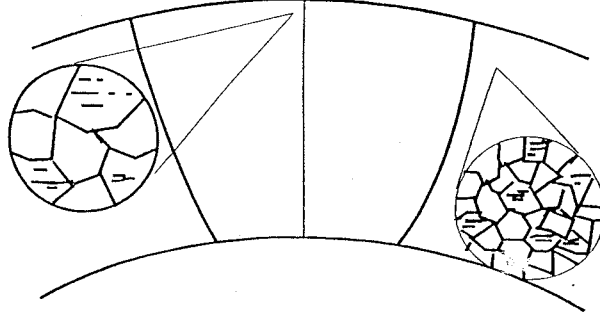
ITAB'ın yeniden sertleşmesi gibi metalurjik değişimlerden kaçınmak için kaynak dikiş sıcaklığı 650 °C'nin altına inmeden hat soğutma suyu uygulanmamalıdır. Bu yüzden boru normalizasyon işleminden sonra belli bir süre serbest soğumaya bırakılmalıdır.

Eğer normalizasyon sonunda dikiş sıcaklığı fazla olursa serbest soğuma için gerekli zaman artacak bu da serbest soğuma bölgesinin daha uzun tutulmasını gerektirecektir.

Normalizasyon sıcaklığı 1010 °C'nin üzerine çıkarsa tane büyümesi problemi karşımıza çıkar. Bu tip bir tane büyümesi mikroskop altında kolaylıkla gözlemlenebilir.

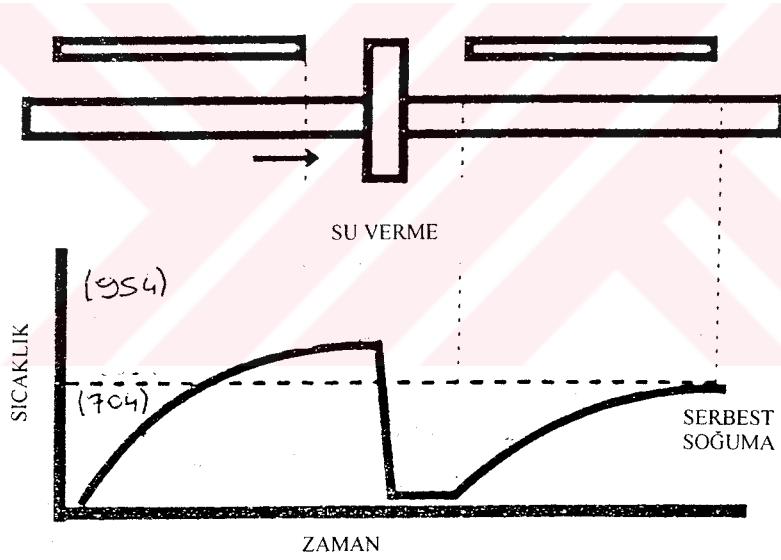
Büyük tane yapısı yassılma testinde borunun yırtılmasına yol açar ve kaynak bölgesi korozyonuna sebep olur.

Şekil 4.45'de tane büyümesinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 4.45 Normalizasyonda tane büyümesi

Tüm borunun normalizasyonu veya temperleme ve su vermenin birlikte uygulandığı yeni çalışmalar mevcuttur. Şekli 4.46'da dikiş normalizasyonuna alternatif olarak geliştirilmiş temperleme ve su verme prosesi görülmektedir.



Şekil 4.46 Temperleme + Su verme prosesi

Bu proste kaynak bölgesi, kaynak ünitesinden hemen sonra bir indüktör yardımıyla yaklaşık 900 °C'ye kadar ısıtılır ve ITAB'da kasıtlı olarak martenzitik yapı oluşturmak için su verilir. Daha sonra ikinci indüktör ile kaynak bölgesi yaklaşık 670 °C'ye ısıtılır. Tüm bu proste hedeflenen ilk önce martenziti oluşturmak daha sonra çok düşük bir sertlik değerini alana dek temperlemektir.

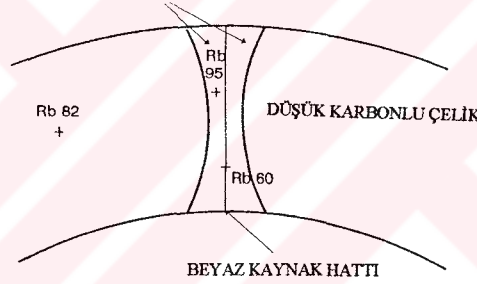
Bu tekniğin geliştirilmesindeki amaç normalizasyon sonu ile soğutma sıvısı uygulama noktası arasındaki serbest soğuma bölgesi olarak tanımlanan mesafeyi azaltmaktır. Uygulamada kaynak hatları serbest soğuma bölge uzunluğu 50-70 m seçilerek kurulurlar.

Temperleme ve su vermenin birlikte yapıldığı yöntemde kaynak bölgesinin hızlı soğutulmasından dolayı dikiş normalizasyonuna kıyasla çatlak meydana gelme potansiyeli daha yüksektir ve kaynak bölgesinde istenen mikroyapının sağlanabilmesi için çok daha fazla proses kontrolü gerekir.

Dikiş normalizasyonunda tüm boru cidarında tavlamanın nüfuz edebilmesi için işlem frekansı boru et kalınlığına ve indüktör ile boru arasındaki mesafeye göre tespit edilir.

Normalizasyon işleminin kontrolü metalografik muayene ile yapılır. Tavlanmış kaynak kesitinin mikroskop altında incelenmesiyle tavlamanın uygun yapıya yapılmadığı tespit edilebilir.

Normalizasyon işleminden sonra bile genellikle beyaz kaynak hattı olarak tanımlanan ince çizgi görülebilir ve bu çizgi normalizasyonun merkezlenmesinin kontrolünde referans olarak kullanılır.



Şekil 4.47 Beyaz kaynak hattı

Normalizasyon nüfuziyetini gözlemlemek için en iyi yol uygun ışık altında, dağlanmış numuneye çıplak gözle bakmaktır. Eğer birden fazla indüktör kullanıldıysa görülen şekil üst üste binmiş tavlı bölgeler halindedir. Normallenmiş bölgedeki mikroyapı hemen hemen ana malzeme ile aynıdır. Eğer tavllanmış bölgedeki tane yapısı ana malzemedeki yapıdan büyükse normalizasyon sıcaklığı çok yüksek tutulmuş demektir.

Tavllanmış bölgedeki sertliğin yüksekliği ise tav sıcaklığının düşük tutulduğunu gösterir. Nispeten küçük taneler içerisinde birkaç büyük tane mevcutsa tam kenar bölgedeki sıcaklık çok yüksektir.

Uygun olarak tavllanmış kaynak dikiş mat gri renkli olur ve ince pullanmalar gösterebilir. Dış kazıma işleminden sonra tavlandıktan soğumaya bırakılan kaynak dikişi ise genellikle koyu mavi renktedir.

#### 4.8.1 Sistem Elemanları

Dikiş normalizasyonu için gerekli ekipmanlar, orta frekans güç kaynağı ile mekanik ayar tertibatları ve soğutma üniteleriyle birleştirilmiş indüktörden ibarettir.

#### 4.8.2 Güç Gereksinimi

Temel olarak normalizasyon işlemi için ihtiyaç duyulan güç birim zamanda geçen kütlenin ve istenilen nihayi tav sıcaklığının bir fonksiyonudur. Aşağıda güç gereksinimi hesabı için bir örnek uygulama verilmiştir;

Boru dış çapı ( $D_d$ )	= 114,3 mm
Et kalınlığı ( $t$ )	= 6,35 mm
Hat hızı ( $v$ )	= 45 m/dak
ITAB genişliği ( $h_0$ )	= 19 mm
Özgül Isı ( $C$ )	= 0,16 kcal/kg-°C (50-978°C arasındaki çelik için)
Normalizasyon başlangıç sıcaklığı ( $T_1$ )	= 50°C
Normalizasyon sonu sıcaklık ( $T_2$ )	= 975°C
Verim ( $\xi$ )	= % 69

(4.1) Eşitliği yardımıyla borunun birim ağırlığı hesaplanabilir.

$$M_{\text{Boru}} = (D_d - t) \cdot t \cdot 0,02466 \quad (4.1)$$

$$M_{\text{Boru}} = (114,3 - 6,35) \cdot 6,35 \cdot 0,02466 = 16,90 \text{ kg/m}$$

(4.2) Eşitliği yardımıyla ısı tesiri altındaki bölgenin birim ağırlığı hesaplanabilir.

$$M_{\text{ITAB}} = M_{\text{BORU}} \frac{h_0}{\Pi \cdot D_d} \quad (4.2)$$

$$M_{\text{ITAB}} = 16,90 \frac{19}{\Pi \cdot 114,3} = 0,89 \text{ kg/m}$$

Birim zamanda tavlancak kütle, denklem (4.3) kullanılarak hesaplanır.

$$M_Q = M_{ITAB} \cdot v \cdot 60 \quad (4.3)$$

$$M_Q = 0,89 \times 45 \times 60 = 2,403 \text{ kg/saat}$$

Denklem (4.4) ile güç gereksimi hesaplanır.

$$P_e = M_Q \cdot C \cdot (T_2 - T_1) \quad (4.4)$$

$$P_e = 2403 \cdot 0,16 (975 - 50) = 355,644 \text{ kcal/saat} \\ = 413,61 \text{ kW}$$

İnverter çıkış gücü denklem (4.5) ile hesaplanabilir.

$$P_e = \frac{P_e}{\xi} \quad (4.5)$$

$$P_e = \frac{413,61}{0,69} = 599,43 = \text{kW} \cong 600 \text{ kW}$$

### 4.8.3 Frekans Seçimi

Frekans seçiminde istenen nüfuziyet derinliği en önemli kriterdir. Denklem (4.6) nüfuziyet derinliğinin hesabında kullanılır.

$$Z = \sqrt{\frac{\Omega}{\mu_r \cdot f}} \cdot 50300 \quad (4.6)$$

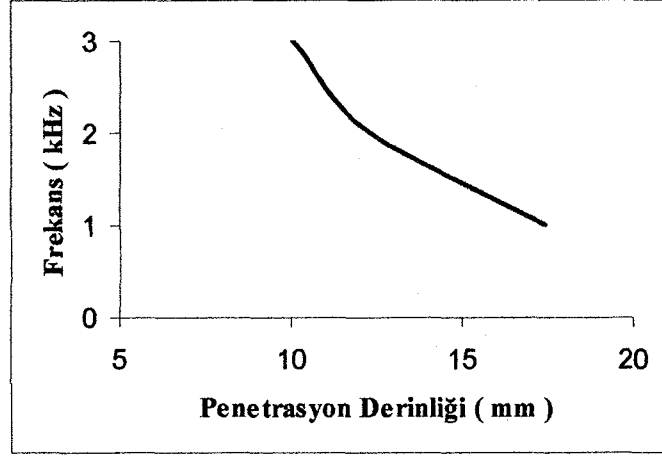
Burada;

Z = Nüfuziyet derinliği (mm)

$\Omega$  = Direnç (ohm/cm)(Curie noktası üzerindeki çelik için  $120 \times 10^{-6}$ )

$\mu_r$  = Özgül geçirgenlik (Curie noktası üzerindeki çelik için 1.0)

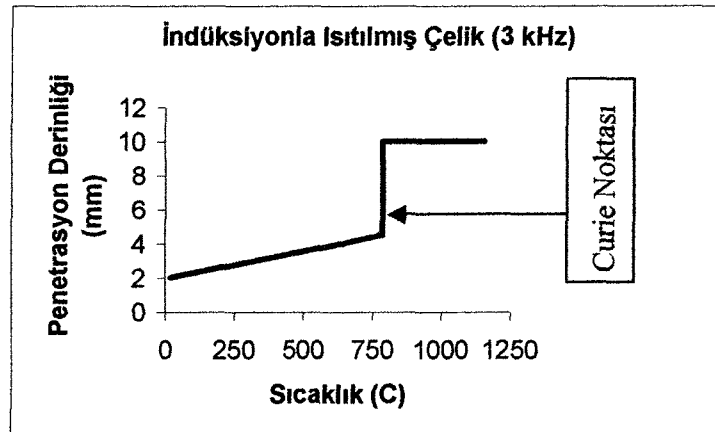
f = Frekans (Hz)



Şekil 4.48 Frekans – Penetrasyon derinliği ilişkisi

Normalizasyonun tüm et kalınlığı boyunca nüfuz edebilmesi için frekansın 1-3 kHz arasında seçilmesi gerekir.

Her ne kadar ideal bir hesapla frekans 1 kHz olarak seçilse de, genel eğilim 3 kHz'lik frekans kullanımıdır. Bunun sebebi frekans düştükçe duyulabilir sesin artmasıdır. Daha yüksek frekans kullanmak nüfuziyet derinliğini azaltacak gibi gözükse de indüktör boyu ve indüktör ile boru arasındaki mesafenin uygun seçimiyle istenilen nüfuziyet sağlanabilir. Ayrıca çelikte Curie noktasının üzerindeki sıcaklıklarda (çelikte yaklaşık 790 °C) penetrasyon derinliğinin önemli bir oranda arttığı unutulmamalıdır. Genelde normalizasyon sıcaklığı bu sıcaklığı aştığından nüfuziyet açısından bir avantaj ortaya çıkmaktadır. Fakat bu salt bir avantaj değildir çünkü aynı sıcaklık artışının sağlanması için Curie sıcaklığı üzerinde daha fazla güç ihtiyacı ortaya çıkmakta ve ısı hesaplarında bu olay dikkate alınmaktadır.



Şekil 4.49 3 kHz Frekans altında tavlanan çelikte sıcaklık-penetrasyon derinliği ilişkisi

#### 4.8.4 İndüktör Tasarımı

İndüktörler yüksek akım ve sıcaklıklar altında çalıştıklarından dayanıklı bir konstrüksiyona sahip olmalı ve aktif kısımları mutlaka soğutulmalıdır.

İndüktörün genişliği istenilen normalizasyon bölgesi genişliği, boyu da birim olan başına sağlayabildiği güç ile belirlenir.

Örnek olarak 560 kW çıkış gücü ihtiyacı için, 2000 kW/m<sup>2</sup> kapasitede indüktör kullanılması durumunu inceleyelim.

Çıkış gücü ifadesi denklem (4.7)'de verilmiştir. Buradan indüktör alanı ( $A_i$ ) elde edilir.

$$P_c = P \cdot A_i \quad (4.7)$$

$$560 = 2000 \cdot A_i$$

$$A_i = 0,28 \text{ m}^2$$

Denklem (4.8) indüktör alanını vermektedir.

$$A_i = L_i \cdot g_i \quad (4.8)$$

Burada;

$L_i$  = indüktör boyu (m)

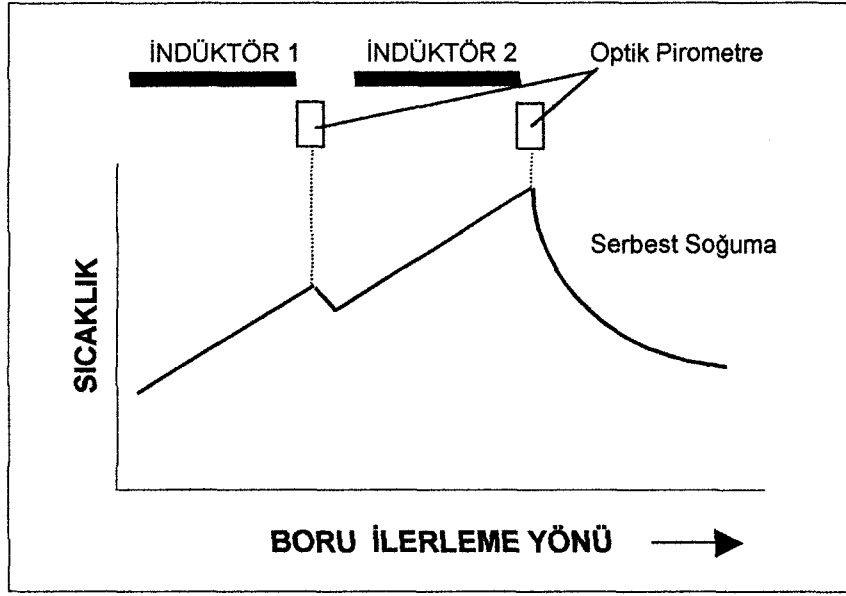
$g_i$  = indüktör genişliği (m)

İndüktör genişliği 0,10 m olarak alınırsa;

$$0,28 = L_i \cdot 0,10$$

$L_i = 2,8$  m olarak bulunur.

Daha fazla güç istendiğinde indüktör boyunun arttırılması ya da birden fazla ardışık indüktör kullanılması gerekir. Şekil 4.50'de çift indüktör kullanımındaki sıcaklık gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.50 Çift indüktör uygulamasında sıcaklık gelişimi

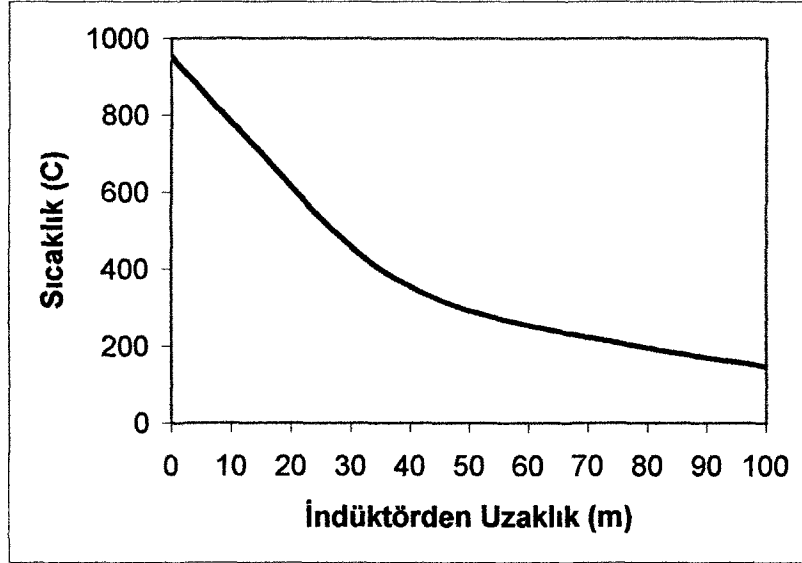
Orta frekans güç indüktöre verildiğinde güç yada elektriksel akı indüktörün içinde ve dışında dolanır. İndüktörün verimini maksimuma çıkarmak ve akıyı boruda istenilen noktaya yoğunlaştırmak için indüktörün üzerine silisli saçtan plakalar yerleştirilir böylece yüzey alanında akı şiddeti artırılmış olur.

Normalizasyonun istenilen düzeyde yapılabilmesi için, indüktör ve boru arasındaki mesafenin korunabilmesi gereklidir. Boruyu ilerleten makaraların rijitliği bu yüzden önem kazanmaktadır.

#### 4.9 Serbest Soğuma

Dikiş normalizasyonundan çıkan boru kaynak dikiş bölgesinde martenzitik yapının oluşmaması için hat soğutma suyunun uygulanacağı sıcaklık  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında olmalıdır. Isıl şok sonucu oluşabilecek distorsiyonlar da dikkate alındığında dikiş sıcaklığı yaklaşık

$370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altına inmeden hat soğutma suyunun uygulanmaması tavsiye edilir. (Bell,1993) Bu açıklanan sebeplerden dolayı kaynak hatları normalizasyon sonrasında yaklaşık 60 m'lik bir serbest soğuma bölümü ile kurulurlar. Bu bölümde makaralar üzerinde ilerleyen boru dikiş bölgesi, çevre atmosferi ile teması sonucu serbest olarak soğur.



Şekil 4.51 Normalizasyon işleminden sonra serbest soğuma eğrisi  
Et kalınlığı 3,2 mm, hat hızı 76,2 m/dak (Bell, 1993)

#### 4.10 Hat Soğutma Sıvısı İle Soğutma

Serbest soğuma bölgesinin ardından, boru, hat soğutma sıvısının yüksek bir debiyle birçok nozülde püskürtüldüğü soğutma ünitesine girer. Bu ünitenin çıkışında kaynak dikiş sıcaklığı yaklaşık 70°C'ye kadar düşer.

#### 4.11 Kalibrasyon

Kalibrasyon ünitesi 4'er merdaneli 4 set olarak dizayn edilmiştir. Merdaneler arasından geçen borunun çapı istenilen toleranslar içerisindedir ve ovalleşme ortadan kalkmıştır.

#### 4.12 Eddy Akımları İle Muayene

Kalibrasyon ünitesi çıkışında kaynak dikişinin hatta tahribatsız muayenesi için Eddy akımları cihazı ile kontrol yapılır. Cihazın hata olarak işaretlendiği bölgelere NDT\* uzmanı tarafından yapılan manuel ultrasonik kontrol yaygın bir uygulamadır. Böylece hatanın tanımlaması yapılarak kaynak operatörü gerekli önlemleri alması için uyarılır.

Örneğin iç fitilin alınmadığı tespit edilmişse daha önce de anlatıldığı gibi hattın durdurularak iç kazıma bıçağının değiştirilmesi, yetersiz kaynak nüfuziyeti tespit edilmişse baskının artırılması gibi müdahaleler yapılır.

\* Non- Destructive Testing – Tahribatsız Muayene

#### 4.13 Uçar Makas

Uçar makas, boru hat üzerinde ilerlerken üretimin sürekliliğini bozmadan boru imalat uzunluğuna göre 30 m, 48 m veya 60 m gibi ilk boy kesiminin yapıldığı ünitedir.

İstenilen boy ayarlanır ve uçar makas kelepçeleri, önünden geçen boy istenilen uzunluğa ulaştığında hidrolik kontrolle otomatik olarak kapanarak, yatay kızaklar üzerinde boru ilerleme yönünde hareket edebilen dairesel testere yardımıyla borunun yüksek hızla ergitilerek kesimi gerçekleşir. Kelepçelerin açılmasıyla dairesel testere ve kelepçe sistemi başlangıç noktasına geri döner. Kesilen boru ise makaralar vasıtasıyla hızla hat yolundan uzaklaştırılır ve fırlatıcı kollar ile transfer tablasına atılır.

#### 4.14 Boy Kesme

Uçar makas ünitesinde ilk kesimi yapılan borunun boy kesme tezgahında 6,8,12 m veya istenilen diğer bir boyda kesimi yapılır. Ayrıca yassılma testi numuneleri de burada alınır.

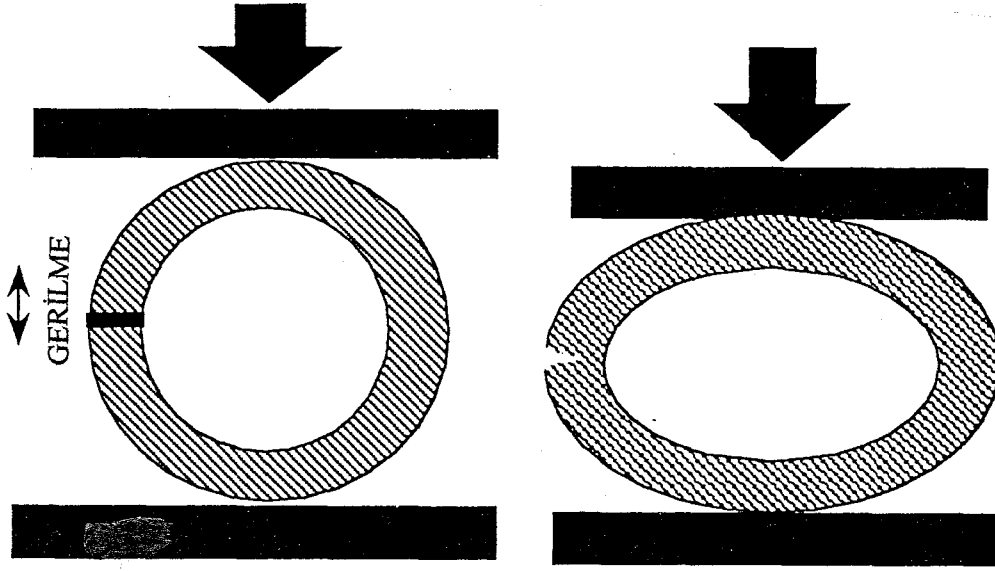
Geri izlenebilirlik prosedürleri gereğince her boruya ait bir numara verilmesi de bu üniteye yapılır. Böylelikle kalite kontrol aşamalarında veya boru hatta çalışırken ortaya çıkan bir hatanın araştırılması mümkün olur. Boru numarasından yola çıkılarak, borunun imal edildiği vardiyaki, daha önceden kayıt edilmiş kaynak parametreleri, boru malzemesi şarj numarası, v.b. bilgilere ulaşılabilir.

#### 4.15 Yassılma Testi

Yassılma testi çoğu zaman her bant için, o banttaki imal edilen boruların belirli bir kısmına uygulanmaktadır. Tahribatsız muayenenin yerini tutmadığından kaynak alanında metalografik değerlendirme imkanı vermez ve nadir olarak bağ düzleminde hata olduğu konusunda erken uyarı görevi görür.

Alınan numune bir hidrolik pres yardımıyla kontrollü olarak basılır. Yassılma testinde hem iç hem de dış kaynağın testi yapılabilir. Kaynak dikişi 90°(270°) pozisyonunda iken basınç uygulandığında tarafsız eksenin üzerinde dış çap çeki, altında ise iç çap ise bası kuvvetleri altındadır. Kaynak dikişi 0°(180°) pozisyonunda basınç uygulanırsa bu sefer dış çap bası, iç çap ise çeki kuvvetleri altında şekil değiştirir.

13. Yassılma Testi  
13. Yassılma Testi



Şekil 4.52 90° Yassılma testi

Numuneler, 100 mm dış çapa kadar en az boru dış çapı boyunda seçilmelidir. ASTM\* ve API\*\* gibi organizasyonlar, yayımladıkları standartlarda, numunenin, bir ölçü veya dış çapın belirli bir yüzdesi olarak tanımlanan, doğru yapılmış kaynağın kırılmadığı bir minimum yüksekliğe kadar basılarak kontrol edilmesini şart koşarlar. Uygunsuz kaynak veya normalizasyon durumunda bu minimum yükseklik aşılmadan numune yırtılır.

API 5L'e göre, bant sonu ve başından, 0° ve 90° pozisyonunda birer adet, bant arasından ise iki adet numune 90° pozisyonunda basılarak test edilmedir.

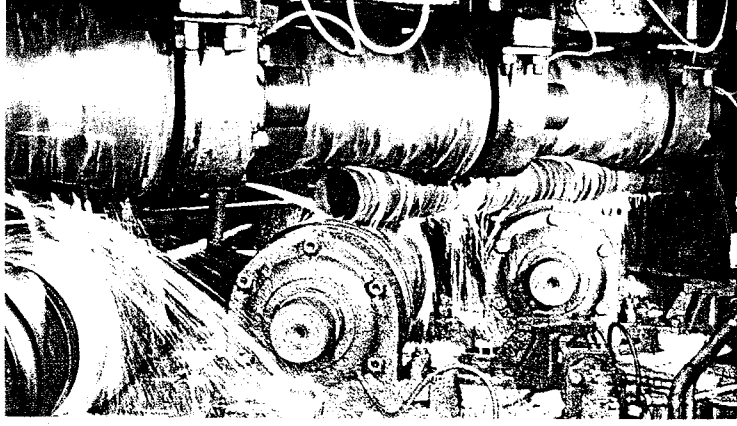
#### 4.16 Doğrultma

Boy kesimi tamamlanan borular düzlemselliklerini tekrar kazanabilmeleri için doğrultma tezgahında Şekil 4.53'de görüldüğü gibi merdane çiftleri arasından geçirilirler.

Yapılan soğuk bir şekillendirme prosesidir ve işlem esnasında merdane yüzeylerine sürekli olarak bor yağı emülsiyonu püskürtülür.

\* American Society for Testing Materials - Amerikan Malzeme Muayene Cemiyeti

\*\* American Petroleum Institute - Amerikan Petrol Enstitüsü



Şekil 4.53 Doğrulma prosesi

#### 4.17 Kaynak Ağzı Açılması

Boruların hatta birbirlerine kaynak edilebilmeleri için boru başlarına kaynak ağzı açılır. Bu işlem, borunun sabitlenerek kesici takımın dairesel hareketiyle talaş kaldırıldığı boru tornası adı verilen tezgahlarda gerçekleştirilir.

#### 4.18 Boru İç Yıkama

Kaynak esnasında oluşan iç kaynak fitilinin iç kazıma bıçağı ile alındığı ve bu fitilin borunun içinde kaldığı daha önce açıklanmıştı. Genelde borunun içindeki fitilin dışarı çıkartılması ve boru içinin dökülmüş curuf, çapak gibi parçacıklardan basınçlı su ile temizlenmesi bu üniteye yapılır.

#### 4.19 Dış Taşlama

Boru dış kaynak yüzeyinde gözle görülür fazlalıklar manuel olarak taşlanarak alınır.

#### 4.20 İç Taşlama

İç kaynak fitilinin tamamen veya kısmen kazınmadığı durumlarda iç taşlama ünitesinde boru içerisinde dairesel taşlama uygulamasıyla kaynak fitili alınır.

#### 4.21 Hidrotest

Hidrotest ünitesi, imal edilen boruların çoğu zaman işletme basınçlarının üzerindeki basınç değerlerinde test edildiği ünite dir.

İki ucundan kapatılan borunun içerisine bor yağı emülsiyonu pompalanarak borunun tamamen dolması ve iç basıncın istenilen test basıncına çıkması sağlanır. İlgili standarda göre boru belirli bir süre bu basınçta tutulur. Boruda meydana gelebilecek bir patlama veya terleme olayı basınç göstergesinde basıncın düşmesi ve çoğu zaman ise fişkıran sıvının gözle görülmesiyle tespit edilir. Bu durumda boru ret olunur. Test basınç-zaman grafikleri kaydedilir.

API ve yaygın olarak kullanılan gaz borusu standartlarında boru malzemesi akma sınırının üzerinde hidrotest uygulanabildiği gibi 24 saat veya 48 saat süreli testler de yapılabilir.

#### **4.22 Genel Kontrol**

Hidrotest çıkışında imal edilmiş borunun, kaynak ağzı laminasyon kontrolü, kaynak ağzı kök yüksekliği ve açısının kontrolü ve boru doğrusalık kontrolleri yapılır. Daha önceden verilmiş boru numaralarıyla boru boy ve ağırlığı kayda alınır.

#### **4.23 Ultrasonik Kontrol**

Ultrasonik kontrol ünitesinde kaynak dikişinin çok problu otomatik bir sistemde çatlak ve diğer hataların tespiti için muayenesi yapılır. Cihaz daha önceden yapılan kalibrasyonu doğrultusunda hata olarak tespit ettiği yerleri boya ile işaretler.

İşaretlenen kısımlar NDT uzmanı tarafından manuel ultrasonik cihazlarla tekrar kontrol edilir.

İç ve dış kaynak fitilinin yetersiz alınmış olması, çatlak ve diğer kusurların tespitini imkansız kılar ve ayrıca istenmeyen bir durumdur.

Bu durumda boru iç ya da dış taşlama işlemleri uygulanmak üzere kaynak hattının ilgili kısımlarına alınarak taşlama işlemi sonrasında tekrar test edilirler.

Kılcal çatlak, derin kazıma, nüfuziyetsizlik v.b. hatalar tespit edildiğinde, boru ret edilir.

Gaz borusu standartlarına göre ret olan bir boru su ve konstrüksiyon borusu için gerekli standartları çoğu zaman sağlar.

Hatalı kısma ait boru parçasının kesilmesiyle hatasız parçalar elde edilebilir. Bu yüzden petrol ve gaz boru standartları çoğu zaman tam bir boru boyu tanımlamaz ancak boru boyunun belirli bir aralıkta olması istenir.

Kısa boru miktarının artması belirli bir hat uzunluğu için daha fazla boru ve dolayısıyla daha fazla kaynak eki gerekeceği için maliyetler ve alınan risk artar. Bu yüzden çoğu zaman bir kısa boru boyu aralığı belirtilir ve kısa boru miktarının belirli bir oranı aşması istenmez.



## **5. YÜKSEK FREKANS KONDÜKSİYON ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAKLI ÇELİK BORU ÜRETİMİNDEKİ ELEKTRİKSEL VE METALURJİK OLAYLAR**

### **5.1 Elektriksel Olaylar**

Yüksek frekans kaynağındaki en önemli iki elektriksel olay, yüzey etkisi ve yakınlaşma etkisi olarak tanımlanan ve sadece yüksek frekans akımına özgü olan iki oluşumdur.

Yüzey etkisi kontaklar tarafından verilen yüksek frekans akımının bant kenarları üzerinde yoğunlaşmasıdır. Böylece akım nüfuziyeti sınırlandırılır ve kaynak esnasında ısınmanın sadece bant kenarlarında, minimum bir derinlikte gerçekleşmesi sağlanır. Nüfuziyet derinliği frekansla ters orantılıdır böylece yüksek frekansta yapılan çalışmada elde edilen minimum ısınma sayesinde yüksek kaynak hızlarına ulaşılır ve kaynak dikiş kalitesinde önemli artışlar sağlanabilir.

Yakınlaşma etkisi ise paralel iki iletken içinden ters yönlerde geçen akımın, iletkenlerin en yakın bölgelerinde yoğunlaşması olarak açıklanabilir.

Yüzey ve yakınlaşma etkilerinin kombinasyonu ile ısıtılan metal miktarının ve kullanılan akımın azalması sağlanır bu da verimin artması demektir.

#### **5.1.1 Kaynak Frekansının Etkileri**

Boyuna dikişli elektrik direnç kaynağı yönteminde, yumuşak çeliklerin kullanılması durumunda bile aşırı şiddetli geri yayılma kuvvetleri ortaya çıkar. Çelik ve diğer metaller ergime sıcaklığında veya ergime kuvvetlerine maruz kaldıklarında çok zayıf davranırlar. Bu yüzden nihayi üründe en önemli hataların temelini teşkil eden sıcak çatlama ve sıcak yırtılmalara karşı çok hassastırlar. Bu nedenlerden dolayı yüksek frekans kaynağında ergiyik tabaka kalınlığı istenilen boyutta elde edilir ve bağ düzleminden dışarı atılır.

Aşağıda ergiyik metalin bağ düzlemi dışına atılabilmesi gerekli şartlar incelenecektir.

##### **5.1.1.1 Matematiksel Yaklaşım**

Yüksek frekans kaynak prosesini anlayabilmek için kaynaktaki elektromanyetizma ve ısıl kondüksiyon olaylarını incelemek gerekir.

Prosesi tam olarak açıklayan 2 denklem aşağıda verilmiştir;

$$\nabla^2 \vec{J} - i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma \cdot \vec{J} = 0 \quad (5.1)$$

$$K \cdot \nabla^2 T - \rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} + q = 0 \quad (5.2)$$

Burada;

$\vec{J}$  = Borudaki elektriksel akım yoğunluğu

f = Elektriksel kaynak frekansı

$\sigma$  = Malzeme elektriksel iletkenliği

$\mu$  = Malzeme manyetik geçirgenliği

$$i = \sqrt{-1}$$

T = Borudaki sıcaklık dağılımı

q = Malzemede oluşturulan ısı

k = Malzeme ısıl geçirgenliği

$\rho$  = Malzeme yoğunluğu

$C_p$  = Malzeme ısıl kapasitesi

Yukarıdaki denklemlerin çözülmesiyle iki önemli bağıntı daha elde edilir.

$$\text{Elektriksel Referans Derinliği} = \chi = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (5.3)$$

$$\text{Isıl Referans Derinliği} = \delta = \sqrt{\frac{\pi \cdot k \cdot t}{4 \cdot C_p \cdot \rho}} \quad (5.4)$$

Yüksek frekans kaynağında, elektriksel frekans, termik frekans ve bu ikisi arasındaki geçiş modülü olmak üzere 3 ayrı modülde çalışılabileceği matematiksel olarak gösterilebilir.

Daha ileride termik modüldeki çalışmanın tercih edildiği çünkü bu modülde çalışırken prosesin daha kararlı ve verimin daha yüksek olduğu gösterilecektir. Kararlılığın ise kaliteyi oluşturan en önemli faktör olduğu unutulmamalıdır.

Denklem (5.1) ve (5.2) kullanılarak kaynak üçgeni içerisinde verilen yüksek frekans gücünün ifadesi olan aşağıdaki denklem çıkarılabilir.

$$P_0 = \frac{3\pi\Delta T.y_0.dK}{2\chi \left[ \left( \frac{\pi.y_0.\varepsilon}{\chi^2.V_0} + 1 \right)^{3/2} - \left( \frac{\pi.y_0.\varepsilon}{\chi^2.V_0} \right)^{3/2} - 1 \right]} \quad (5.5)$$

Burada;

$P_0$  = Borunun kaynak edilebilmesi için kaynak üçgeni içerisinde ihtiyaç duyulan güç

$D$  = Boru et kalınlığı

$V_0$  = Hat hızı

$y_0$  = Kaynak üçgeni yüksekliği

$\Delta T$  = Malzemeyi kaynak edebilmek için binmedeki sıcaklık artışı

$\varepsilon = K/C_p.\rho$  = Malzeme ısı difüzyonu

Gerçek kaynak gücünün basit matematiksel ifadesi prosesin elektriksel, termodinamik ve mekanik parametreleriyle ilgilidir.

Denklem (5.5) bir kademe daha ilerletirilirse, kaynak frekansı, boru çapı ve kaynak hızı arasındaki ilişkiyi veren önemli bir ifadeyi elde ederiz. (Denklem (5.6))

Isıl Modül için;

$$P_0 \cong \Delta T d \sqrt{\pi.y_0.K.C_p.\rho.V_0} \quad (5.6)$$

Geçiş durumu için;

$$P_0 = 1,81 \Delta T d \sqrt{\pi.y_0.K.C_p.\rho.V_0} \quad (5.7)$$

Elektriksel Güç Modülü için;

$$P_0 = 2 \Delta T \cdot C_p \cdot \rho \cdot d \cdot \frac{\varepsilon}{2} \cdot V_0 = \frac{\Delta T \cdot C_p \cdot \rho \cdot d \cdot V_0}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (5.8)$$

Denklemler incelendiğinde ısı modülde kaynak üçgeni içerisindeki gücün frekansa bağımsız fakat kaynak hızı ve boru çapının kare kökü ile orantılı olduğu görülür.

Geçiş modülünde de (Denklemler (5.7)) kaynak gücü frekansa bağımsız fakat ısı modüle göre 1,81 kat daha fazladır.

Elektriksel güç modülünde ise kaynak gücü, frekansa ve kaynak hızının birinci kuvvetine bağlıdır.

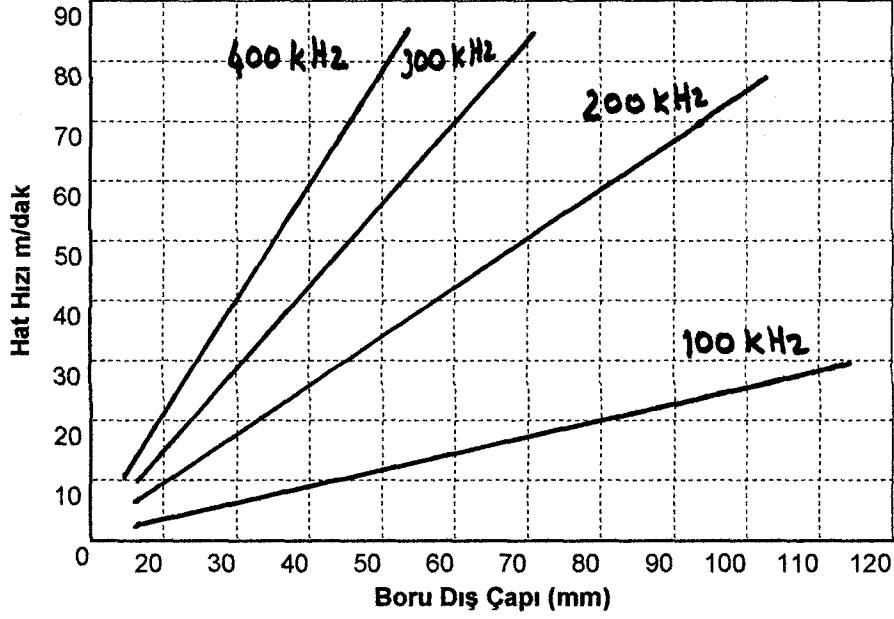
Sonuç olarak elektriksel güç modülünde çalışırken hat hızındaki değişiklikler güç ihtiyacını lineer olarak etkiler. Bu örneğin hızın iki katına çıkması halinde güç ihtiyacının da iki katına çıkması demektir. Isı modülde çalışırken ise kaynak hızı iki katına çıktığında ihtiyaç duyulan güç  $\sqrt{2} \approx 1,414$  kat artmaktadır. Bu örnek için ısı modülde çalışmak elektriksel güç modülüne kıyasla yaklaşık % 30 daha verimlidir.

Belirli bir boru malzemesi ve ölçüleri için denklem 5'in paydasının da manipilasyonu ile geçiş modülünde frekansı veren bir bağıntıyı türetebiliriz.

$$f_{\text{kritik}} = \frac{C_p \cdot \rho}{\pi^2 \cdot k \cdot \mu \cdot \sigma} \cdot \left( \frac{V_0}{D} \right) \quad (5.9)$$

Bu ifadede kaynak üçgeni yüksekliği çok yaklaşık olarak boru çapına eşit alınmış ve bu durumda oluşan frekansa kritik frekans denilmiştir. Kritik frekansın üzerinde ısı modülde, altında ise elektriksel güç modülünde çalışılmaktadır.

Şekil 5.1'de düşük karbonlu çelik için kritik frekans boru çapı ve hat hızının fonksiyonu olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Düşük karbonlu çelik boru imalatında kritik frekans

Bu grafik belirli boru malzemesi, boyut ve hat hızı için en uygun kaynak frekansının seçiminde kullanılabilir. Gerçekten de pratikte bu değerlerle uzun zamanlar çalışılmıştır (Morin, 1996). Yine de aşağıdaki yapılacak analizlerle ısı modülde çalışırken kalitede sürekliliğin sağlanabileceği ve önemli oranda verim artışı elde edilebileceği görülmektedir.

Bu sonuçların deneysel ispatı için aynı malzeme ve boyuttaki borunun 3 değişik kaynak hızında ve 100-400 kHz aralığındaki bir çok kaynak frekansında üretimi gerçekleştirilmiştir. Kaynak alanı ayarlanmış, kaynak üçgeni içerisindeki sıcaklık sabit tutulmuş ve bu sıcaklığı sağlamak için gerekli güç kaydedilmiştir. Isı tesiri altındaki bölgenin genişliği her durum için ölçülmüştür. Güç ve ısı tesiri altındaki bölge genişliği ölçümleri yukarıda yapılan matematiksel analizle çok yakın uyum göstermiştir (Morin, 1996).

### 5.1.1.2 Deneysel Çalışmalar

Bölüm 5.1.1.1'deki analizi daha da geliştirmek için paralel kenarlar boyunca çevresel sıcaklık dağılımını inceleyebilir ve ayrıca kaynak üçgeni içindeki bir noktaya dağıtılan gücü frekansın fonksiyonu olarak ifade etmeye çalışabiliriz.

Elde edilen sonuçlarla, çekme dayanımı profilleri sıcaklık ve kaynak frekansının fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu, ergimiş tabakaya komşu metalin verimli olarak ergiyikten fişkırtılabilme kabiliyetini belirleyen çekme dayanımı dağılımıdır.

Aşağıdaki örneklerde 50 mm dış çap, 2 mm et kalınlığına sahip ve 150 m/dak hızla kaynak edilmiş boru incelenmiştir.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 sırasıyla 200 kHz ve 400 kHz kaynak frekansı altındaki kaynaktaki, kaynak üçgeni başlangıcından boğaz noktasına gerçekleşen sıcaklık dağılımlarını göstermektedir.

400 kHz frekans altında elde edilen grafikte tüm kaynak üçgeni boyunca çok açık bir sıcaklık düşümü olduğu görülmektedir.

200 kHz frekans altında elde edilen grafikte kaynak üçgeninin % 80'inin geçildiği bir noktadaki sıcaklığın kaynak boğaz bölgesi sıcaklığıyla hemen hemen aynı değerde olduğu görülmektedir. Bu noktanın ilerisinde gerçekleşen ısı girdisi ek kayıp enerjiyi meydana getirir ve ayrıca ilave bir kısım metal sıcaklığın hem ferrit hem de östenit meydana getirecek şekilde çift faz aralığına yükselmesine yol açar. Çift faz aralığında daha fazla metalin kaynak merdaneleri arasından geçmesi, ferritik yapının işlenmesi yüzünden meydana gelebilecek hata ihtimalinin artması demektir (Morin 1996).

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 aynı örnek için sırasıyla 200 ve 400 kHz'de kaynak boğazındaki sıcaklık ve güç dağılımını göstermektedir. Kaynak boğazının son noktasına yaklaşıldığında güç eğrisinin aldığı eğime dikkat edilmelidir.

200 kHz'de verilen güç 400 kHz'de verilene kıyasla hala çok daha fazladır ve aynı grafikler üzerinde gösterilmiş sıcaklık eğrileri de bunu kanıtlamaktadır. Malzemeye daha hızlı giren önemli miktardaki aşırı ısı prosesin kararsızlığına yol açar.

Burada gördüğümüz ısıl modül ile elektriksel güç modülü arasında bir fark olduğudur. Düşük frekansta çok daha fazla güç gereksinimi vardır ve bu da verimi önemli oranda etkilemektedir.

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de kaynak boğazındaki sıcaklık dağılımını 100-600 kHz aralığında frekansın fonksiyonu olarak gösteren grafikler verilmiştir. Burada yine düşük frekansta et kalınlığı boyunca yüksek sıcaklıkların ne kadar fazla oynadığının altı çizilmelidir. Bu olay çeliğin sıcak işlenmiş olmasına yol açan kayıp enerjiyi ve istenmeyen yüksek sıcaklıkları doğurur.

Bahsi geçen kaynak modüllerinin etkilerini daha iyi vurgulayabilmek için Ø150 x 8 mm\*, 40 m/dak hızla kaynak edilmiş boru incelenmiştir.

---

\* Bu gösterimle dış çapı 150 mm ve et kalınlığı 8 mm olan boru ifade edilmektedir.

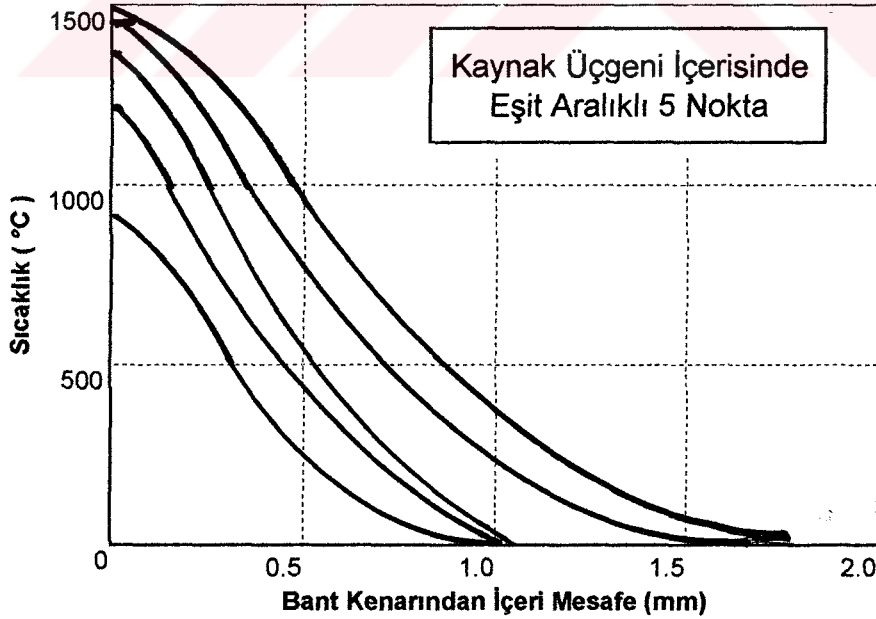
Şekil 5.8 ve Şekil 5.9, 100 ve 400 kHz'de kaynak üçgeni boyunca sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Düşük ve yüksek frekanstaki eğri dizileri oldukça benzerdir. Her iki durum da ısı modüldeki bir çalışmaya aittir.

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 kaynak boğazındaki relatif güç ve sıcaklık dağılımlarını gösterir. Buraya kadar açıklananlar ısı modüldeki çalışmalara ait ve Denklem 6 ile uyum gösteren örneklerdir.

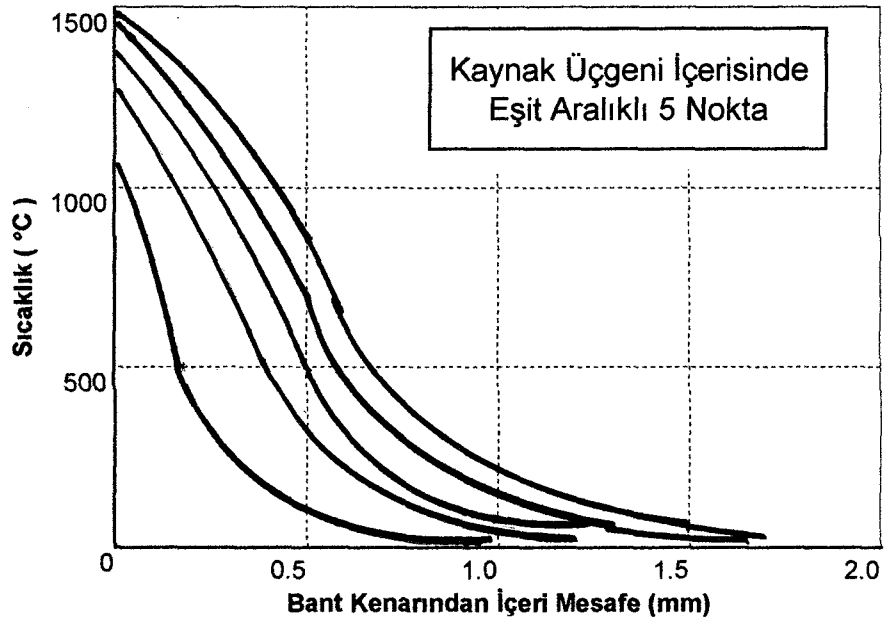
Kaynak üçgeni boğazındaki çekme gerilimi dağılımlarını incelemek de faydalı olur. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de sırasıyla 50 ve 150 mm çaplarda, çekme gerilimi dağılımları gösterilmiştir.

Frekans değiştiğinde, eğrilerin yaptığı dönüm noktalarının yerlerinin tespiti önemlidir. Ergiyik tabakaya olan mesafenin fonksiyonu şeklinde verilen ergiyik tabakaya komşu çeliğin çekme dayanımı, yüksek frekanslarda önemli oranda büyüktür. Bu olay kaynak binme kuvvetlerine bağlı olarak boru kenarı distorsiyonlarının hangi derinlikte oluşacağını açık bir işarettir. Sonuç olarak aynı iki boruya kaynak makinası tarafından verilen güç frekansın fonksiyonu olarak incelenmiştir.

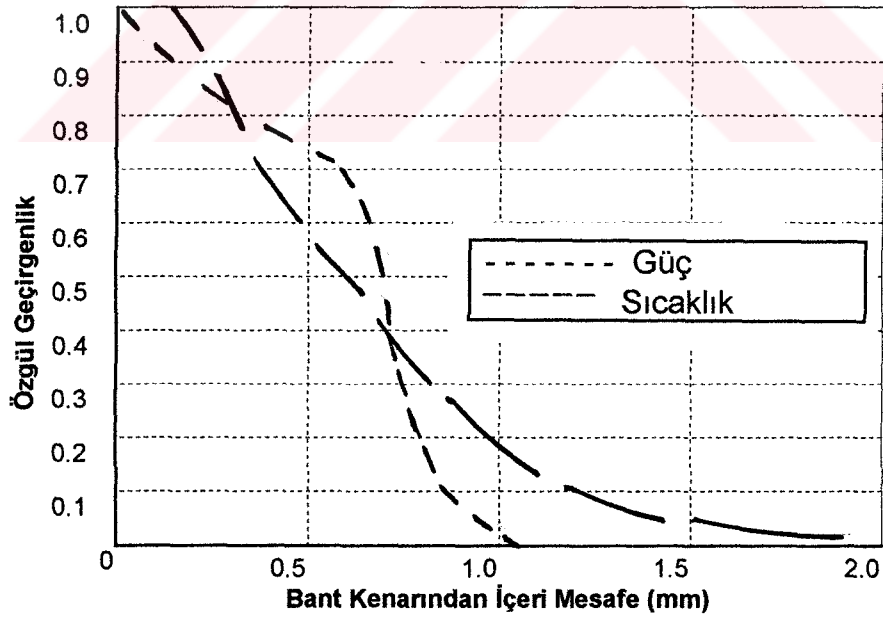
Ufak çap için Şekil 5.15'de görüldüğü gibi denklem 8 ile uyum içerisinde doğrusal bir bağıntı büyük çap için ise Şekil 5.14'de görüldüğü gibi denklem 6 ile uyum içerisinde bir karekök bağıntısı mevcuttur. Bu da ısı ve elektriksel güç modülleri arasındaki belirgin farkı gösterir.



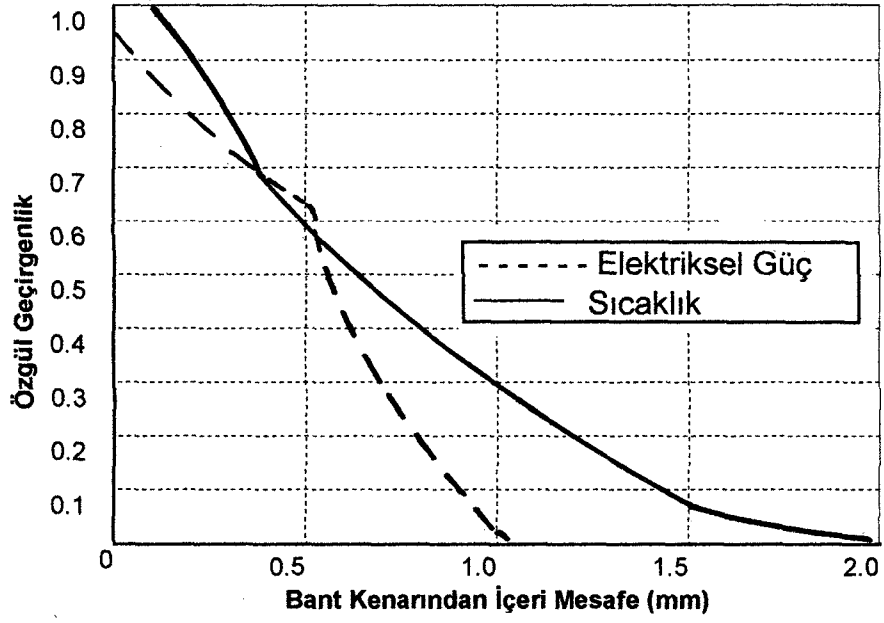
Şekil 5.2 Bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile sıcaklığın değişimi  
 $f=200$  kHz,  $\varnothing 50 \times 2$  mm  $V_0 = 150$  m/dak



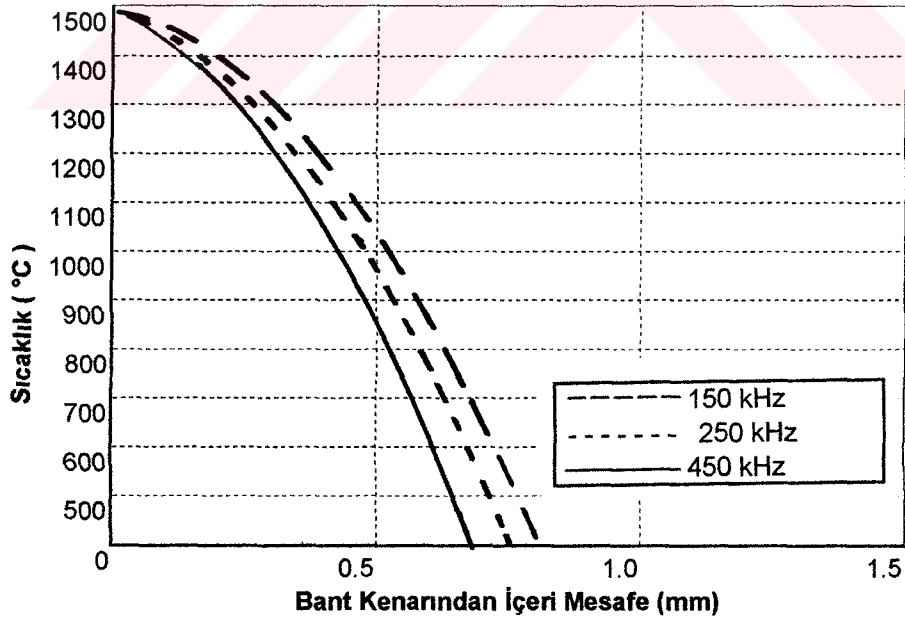
Şekil 5.3 Bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile sıcaklığın değişimi  
 $f = 400 \text{ kHz}$ ,  $\text{Ø } 50 \times 2 \text{ mm}$   $V_0 = 150 \text{ m/dak}$



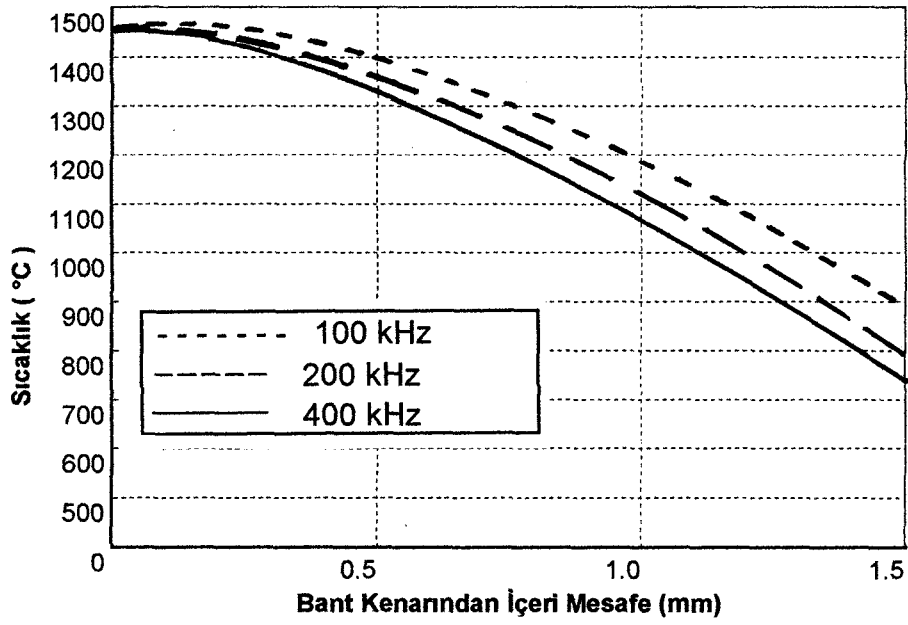
Şekil 5.4 Kaynak boğazındaki sıcaklık ve elektriksel gücün bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile değişimi  $f = 200 \text{ kHz}$ ,  $\text{Ø } 50 \times 2 \text{ mm}$   $V_0 = 150 \text{ m/dak}$



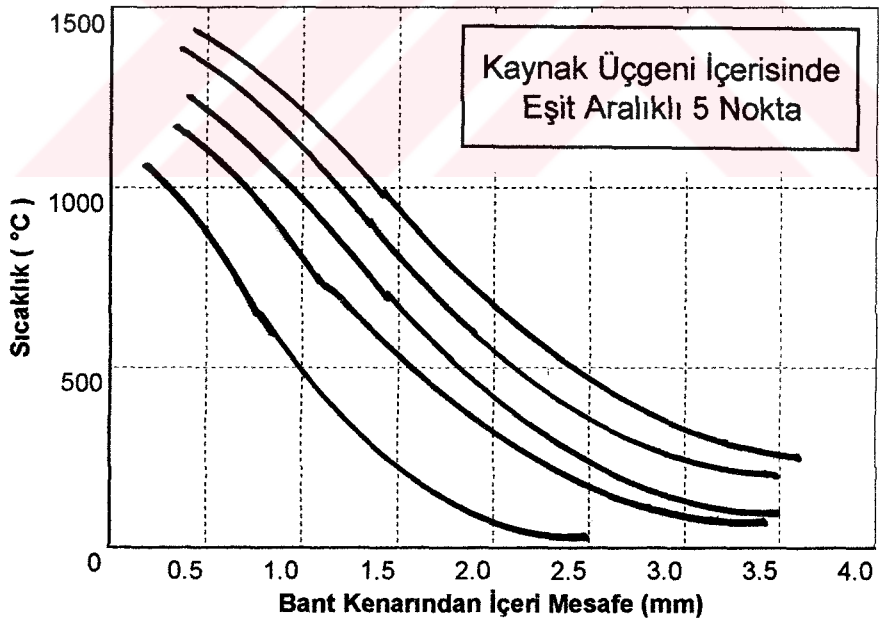
Şekil 5.5 Kaynak boğazındaki sıcaklık ve elektriksel gücün bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile değişimi  $f = 400 \text{ kHz}$ ,  $\text{Ø } 50 \times 2 \text{ mm}$   $V_0 = 150 \text{ m/dak}$



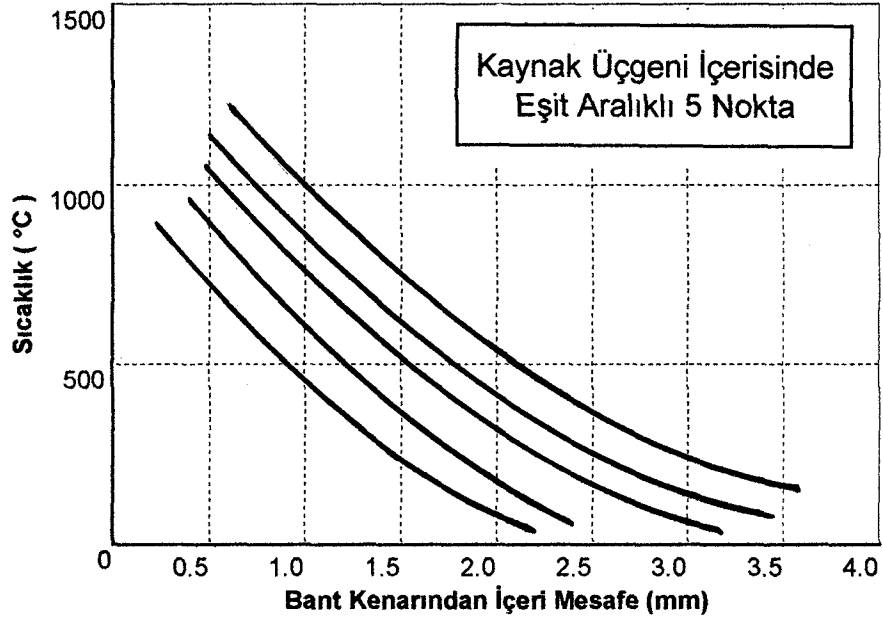
Şekil 5.6 Kaynak frekansının fonksiyonu olarak kaynak üçgenindeki sıcaklık dağılımı  $\text{Ø } 50 \times 2 \text{ mm}$   $V_0 = 150 \text{ m/dak}$



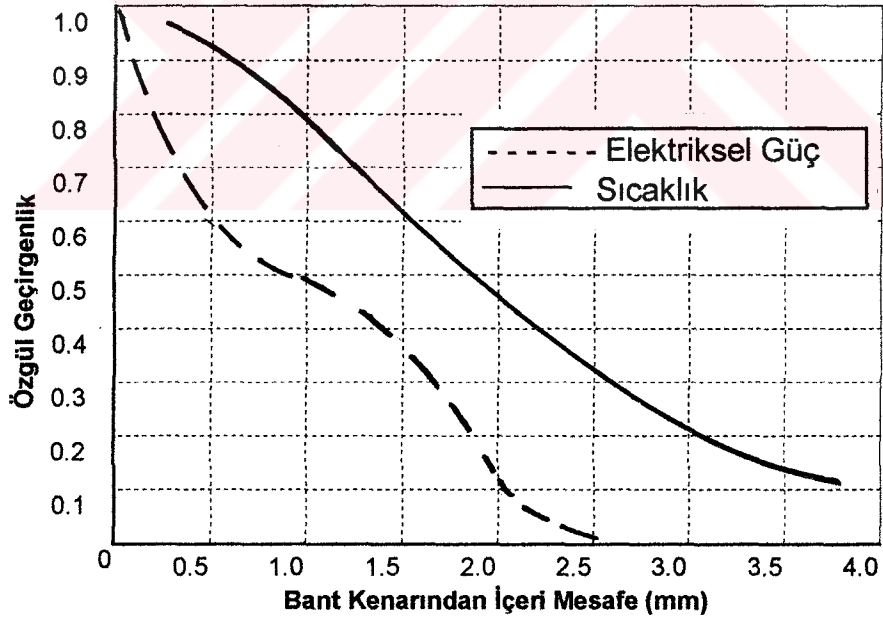
Şekil 5.7 Kaynak frekansının fonksiyonu olarak kaynak üçgenindeki sıcaklık dağılımı  
 $\varnothing 150 \times 8 \text{ mm } V_0 = 40 \text{ m/dak}$



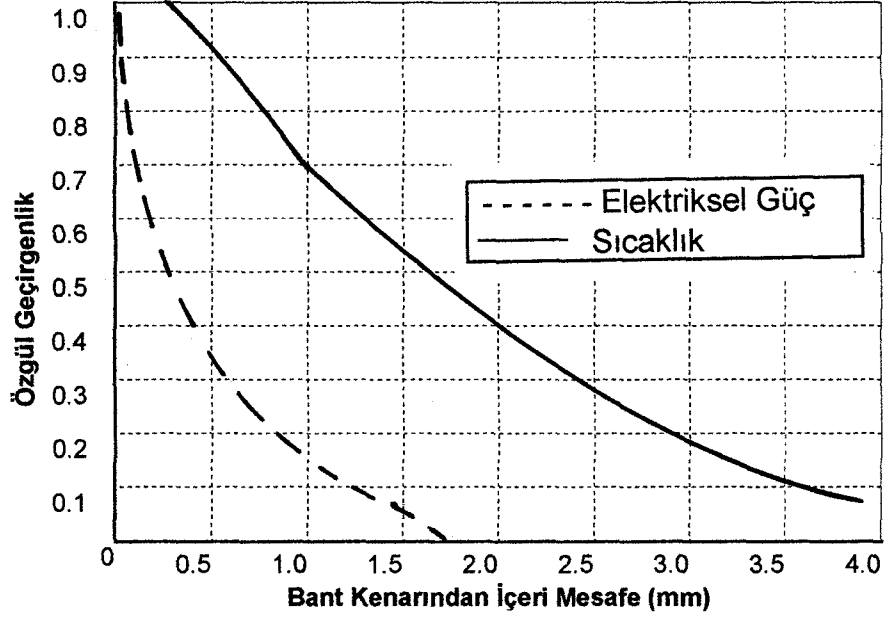
Şekil 5.8 Bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile sıcaklığın değişimi  
 $\varnothing 150 \times 8 \text{ mm } V_0 = 40 \text{ m/dak } 100 \text{ kHz}$



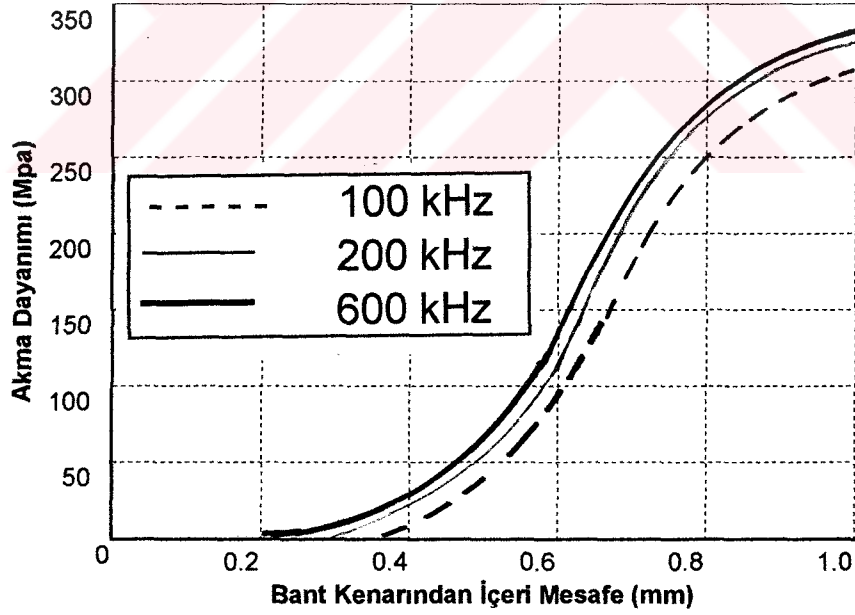
Şekil 5.9 Bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile sıcaklığın değişimi  
 $\text{Ø}150 \times 8 \text{ mm } V_0 = 40 \text{ m/dak } 400 \text{ kHz}$



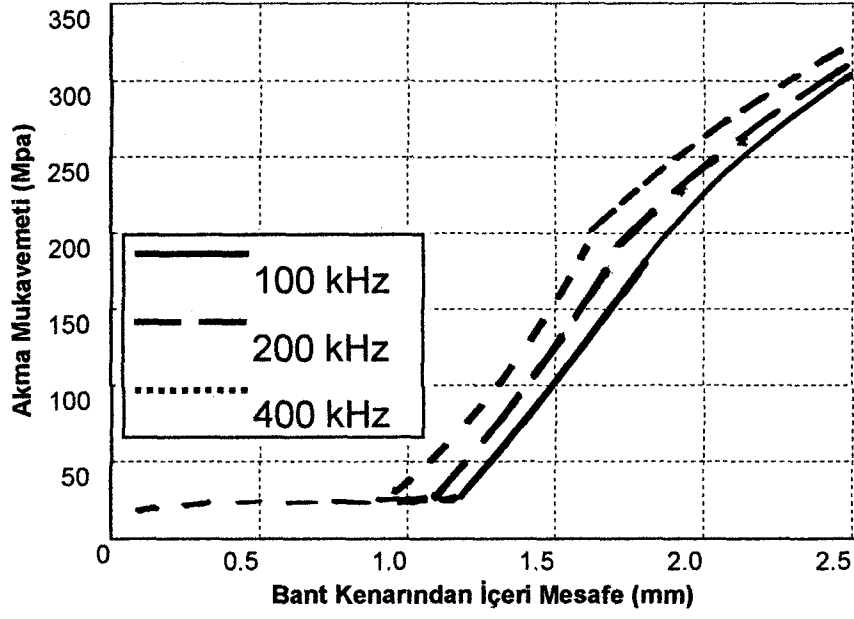
Şekil 5.10 Kaynak boğazındaki sıcaklık ve elektriksel gücün bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile değişimi  $\text{Ø}150 \times 8 \text{ mm } V_0 = 40 \text{ m/dak } 100 \text{ kHz}$



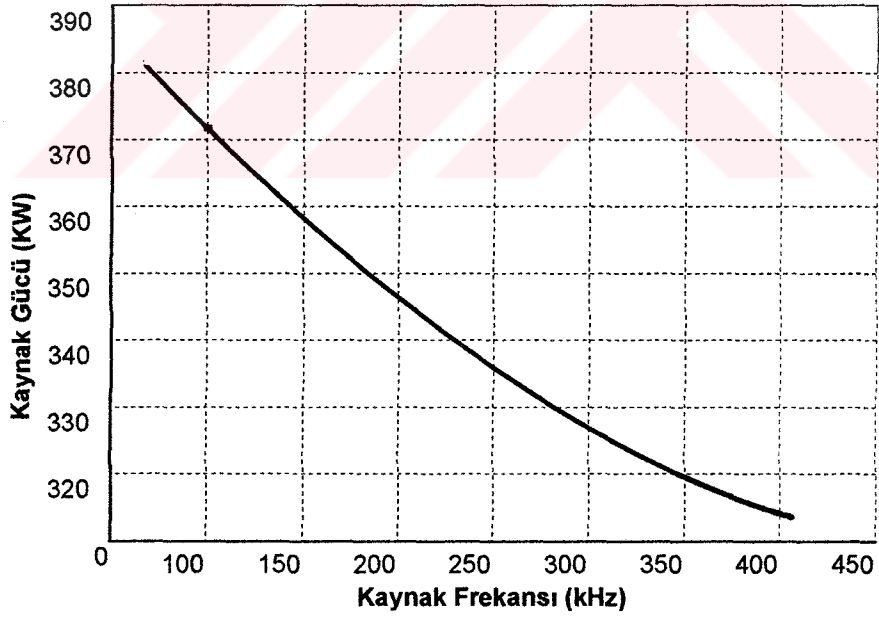
Şekil 5.11 Kaynak boğazındaki sıcaklık ve elektriksel gücün bant kenarından içeri doğru olan mesafe ile değişimi  $\varnothing 150 \times 8 \text{ mm}$   $V_0 = 40 \text{ m/dak}$   $400 \text{ kHz}$



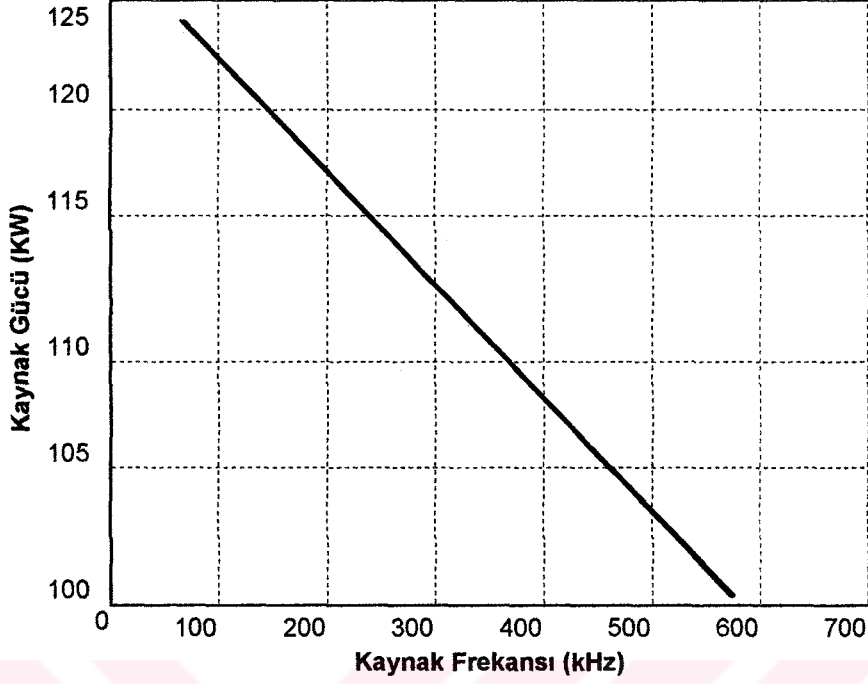
Şekil 5.12 Kaynak frekansının fonksiyonu olarak kaynak boğazındaki akma dayanımı  $\varnothing 50 \times 2 \text{ mm}$   $V_0 = 150 \text{ m/dak}$



Şekil 5.13 Kaynak frekansının fonksiyonu olarak akma dayanımı  
 $\text{Ø } 150 \times 8 \text{ mm } V_0 = 40 \text{ m/dak}$



Şekil 5.14 Kaynak frekansının fonksiyonu olarak kaynak makinası gücü  
 $\text{Ø } 150 \times 8 \text{ mm } V_0 = 40 \text{ m/dak}$



Şekil 5.15 Kaynak frekansının fonksiyonu olarak kaynak gücü gereksinimi  
Ø 50 x 2 mm  $V_0=150$  m/dak

## 5.2 Metalurjik Olaylar

Kaynak üçgeni içerisinde, ısıtmanın sonundan binmenin başlangıcına doğru olan bölgede meydana gelen ergiyik metal içi oluşumlar kaynak kalitesi üzerinde en önemli etkiye sahiptir.

Kaynak boğaz bölgesi çoğu zaman soğutma sıvısı, buhar duman, metal damlacıkları ve kimi zamanda kaynak merdaneleri tarafından gizlenmiştir. Boğaz bölgesindeki sıcak metalin şiddetli parlaklığı çıplak gözle inceleme yapmayı hemen hemen imkansız kılar.

Ergiyik metal hakkında bilinenler, birçok değişik kaynak hattında, çeşitli malzemelerle yapılan kaynakların incelenmesi ve sonuçlar çıkarılması ile elde edilebilmiştir.

Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynağında iki önemli oluşum vardır. İlki ergiyik metalin çevre ile olan reaksiyonu şeklide özetlenebilecek, seçici oksidasyon, ikincisi ise sıvı metal püskürmesi olarak adlandırılan ve ergiyik metalin kaynaşması esnasında kaynak boğaz bölgesinde gözlemlenen periyodik kararsızlık halidir.

Aşağıda açıklanan teori ve sonuçların ortaya çıkarılması deneysel çalışmalarla mümkün olmuştur. Araştırmacılar birçok durumda laboratuvar şartlarında yapılan kaynağın boğaz

bölgesinin yüksek hız hareket fotoğraflarından faydanlanmışlardır. Yine de kaynaktaki ergiyik metal davranışının tam olarak anlaşılammış özellikleri mevcuttur.

### 5.2.1 Kaynak Bölgesindeki Metalurjik Reaksiyonlar

Isı girdisiyle beraber boru bandı kenar sıcaklığı 705°C'ye ulaştığında ferritik yapı östenite dönüşmeye başlar yani kafes sistemi hacim merkezli kübikten (HMK) yüzey merkezli kübiğe (YMK) dönüşür. Karbon östenitte daha iyi çözüldüğünden, östenit yapıya geçmiş kenarlara doğru karbon difüzyonu meydana gelir. Kenarlar ısınmaya devam ettikçe ana metale doğru da bir ısı akışı olur ve aynı dönüşümler gerçekleşir.

Sıcaklık yaklaşık 1485°C'ye ulaştığında metal sıvı hale gelerek oksijen ile reaksiyona girmeye başlar ve demiroksit oluşur. Karbon da oksijenle yaptığı reaksiyonlarla ergiyik dışına çıkan veya içinde kalan CO ve CO<sub>2</sub>'yi meydana getirir. Şekil 5.16'da gösterildiği gibi karbon sıvı metalin dışına difuze olur ve oksijenle birleşerek CO<sub>2</sub> meydana getirir. Bu reaksiyonların gerçekleştiği ince hattaki metal karbonca fakirleşir. Soğuma ile beraber bu karbonsuz bölgede HMK ferritik yapı oluşur. Bu oluşum mikroskop altında kolayca gözlemlenebilen ve beyaz kaynak hattı olarak adlandırılan bölgeyi ortaya çıkarır. Bu hattın ince ve üniform bir şekilde meydana gelmesi iyi bir kaynak işlemi yapıldığının işaretidir.

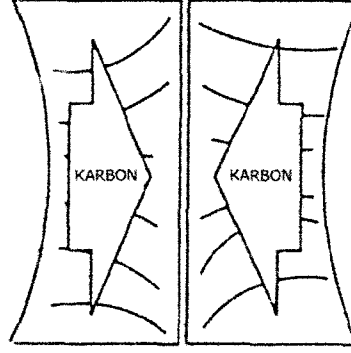
Beyaz kaynak hattının oluşmasının sebebi manganın seçici oksidasyonudur. Kaynak bölgesine normalizasyon tavı uygulamak manganın beyaz kaynak hattına geri dönmesini sağlamaz fakat yapılan deneylerde kaynak bölgesinin 965°C'de 2 saat boyunca tutularak manganın yeniden difüzyonu sağlanmış ve beyaz kaynak hattının gözden kaybolduğu gözlemlenmiştir. Karbon-mangan çeliğinin asal gaz atmosferi altında kaynak yapılmasıyla beyaz kaynak hattının meydana gelmediği kaliteli kaynak dikişleri elde edilmiştir (Oppenheimer, 1997).

Bant kenarlarının ergimesi esnasında, ergimiş kısmın çevre atmosferi ile teması sonucu, bant kenarlarında oksitler oluşur. Oksitlenme olayı sıcaklığın artmasıyla daha da büyük boyutlara ulaşır. Meydana gelen oksit kalıntıları malzemenin tokluğunu önemli oranda düşürür.

Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynağında uygun kaynak parametreleri kullanıldığı takdirde, oksitlerin büyük bir bölümü binme prosesinde gerçekleşen fişkıma sonucu bağ düzlemi dışına atılır ve optimum ısı girdisiyle minimum oksidasyon ve maksimum kaynak dikiş kalitesi elde edilebilir.

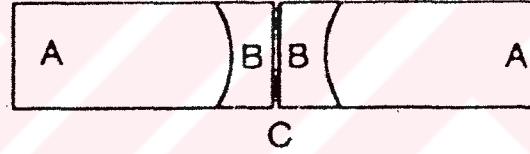
Kenarlar binme prosesinde birbirlerine bastırıldıklarında oksitlenmiş metal ve altındaki ergiyik metal sıkıştırılır. Sıvı tabakasının altındaki oksitlenmemiş sıcak metal kısımlar karşılıklı olarak temas ederek kaynağı oluştururlar.

Karbon sıcak kenarlara doğru hareketini sürdürdüğünden kenarlar çevresindeki bölge karbonca fakirleşmiştir. Bu yüksek frekans kaynağında beyaz hattı oluşturan karbonsuz kısımdır.



Şekil 5.16 Karbon segragasyon bantları

Kaynağın tamamlanmasından hemen sonra kaynak ve çevresinde bir dizi mikroyapı mevcuttur.



Şekil 5.17 Kaynak sonrasındaki mevcut bölgeler

Bu mikro yapılardan ilki kenarların dışında, ana metal olarak isimlendiğimiz ve ısıdan etkilenmemiş bir bölgedir (A). Bu bölgeden kaynak bağ düzlemine doğru ilerlediğimizde, ısınan fakat ergimenin gerçekleşmediği, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak adlandırılan kısma gelinir (B). ITAB'ı ise bağ düzlemi olarak adlandırılan ve en yüksek sıcaklığın meydana geldiği bölge izler (C).

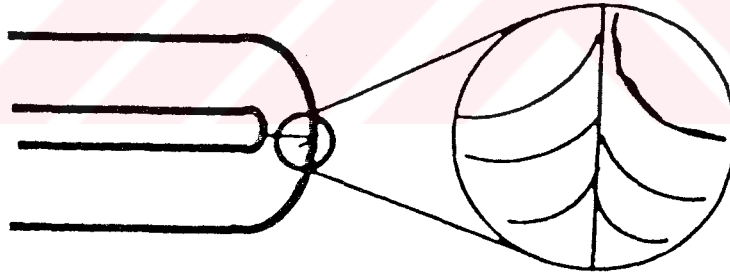
Ana metal olarak adlandırılan bölgede kaynaktan sonra hiçbir değişiklik olmamıştır ve mikroyapı HMK, ferrit ve demirkarbür karışımı şeklindedir. ITAB ise mikroyapıda değişikliklerin meydana geldiği bir bölgedir.

Isı tesiri altındaki bölge genişliği aşağıdaki parametrelerle belirlenir;

- a) Kaynak sıcaklığı
- b) Kaynak edilen malzeme et kalınlığı
- c) Kaynak bölgesindeki soğutma sıvısı miktarı

Genellikle kalın kesitler daha fazla ısı tutarlar ve ince kesitlere kıyasla daha yavaş soğurlar. Kaynak bölgesinde aşırı soğutma sıvısı bulunması soğutma hızını arttıracaktır.

Kaynak bölgesinin ani soğuması ise ITAB'da martenzit oluşmasına sebep olur. Kimyasal kompozisyonda yüksek oranda karbon bulunması daha sert ve kırılğan martenzit oluşmasına yol açar. Karbon oranı dikkate alınırken Bölüm 3'de bahsedildiği gibi boru bandının üretimi esnasında meydana gelen, karbonun ingot merkezinde toplanma eğilimi sonucu, malzeme analizindeki ortalama karbon oranının çok üstünde karbon oranlarının karşımıza çıkabileceği unutulmamalıdır. Örneğin % 0,10 C'lu çelikte karbon segragasyon bantlarında Rc50 gibi yüksek sertlik değerlerine rastlanabilir (Nichols, 1995). Bu olay Şekil 5.18 'de görüldüğü gibi yassılma testinde ortaya çıkan çatlakları meydana getirmektedir.



Şekil 5.18 Malzeme akış çizgileri doğrultusunda meydana gelen çatlak

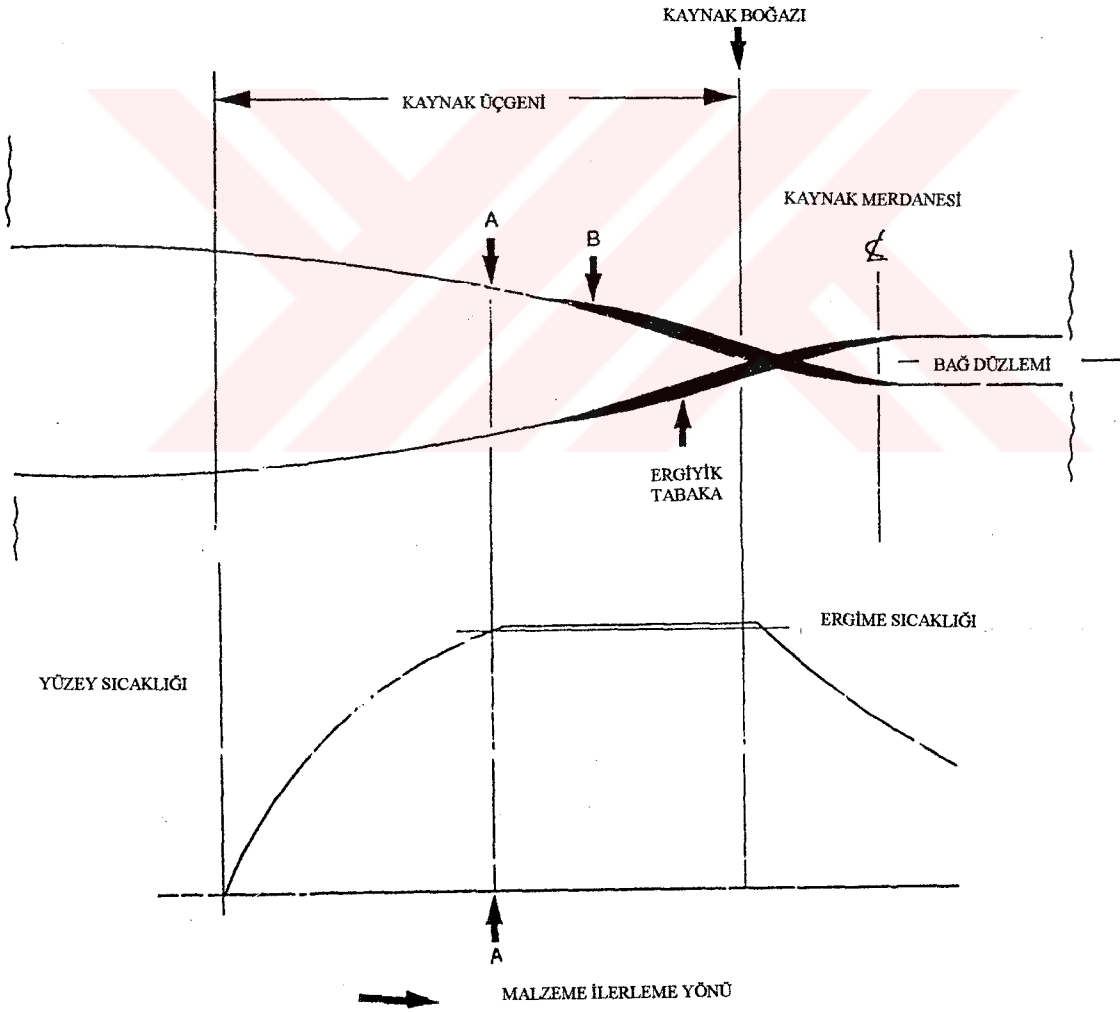
Bu çatlakların yassılma testinde tespit edilememesi, işletme şartlarında çok daha vahim sonuçlara yol açabilir.

Çizelge 5.1'de AISI 1020 karbon çeliği için ferritik ve martenzitik yapıdaki özellikler gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Ferritik ve martenzitik yapıdaki mekanik özellikler (Nichols,1995)

Mekanik Özellikler	Ferritik (Tavlanmış)	Martenzitik (Su verilmiş)
Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	473	747
Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	353	422
Uzama %	39	15
Kesit Büzülmesi %	66	33
Sertlik BHN	111	217

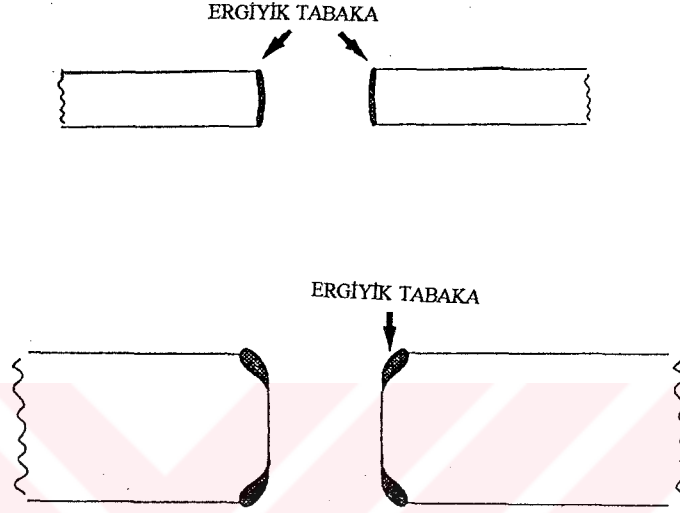
Kaynak üçgeni başlangıcından boğaza doğru ilerleyen bir noktadaki sıcaklık Şekil 5.19'da görüldüğü gibi artacaktır. Bu nokta ergimenin başladığı (A) gibi bir bölgeye gelecek ve bu bölgeden sonra sıcaklık, ergiyik metalin bir miktar daha ısınması ve ergiyik metal tabakasının kalınlaşmasıyla hafifçe artacaktır.



Şekil 5.19 Kaynak üçgeni ve sıcaklık dağılımı

Kaynak akımı karşılıklı yüzeyler boyunca aktığı gibi bant kenarları iç ve dış yüzeylerinde de aktığından, karşılıklı yüzeylerin köşelerindeki ısınma merkezindekinden daha büyük olacaktır. Bu olay ergimenin öncelikle köşelerde meydana gelmesine yol açar.

Şekil 5.19'da tanımlanmış olan B gibi bir bölgedeki ince ve kalın çeperli borulardaki ergiyik metal tabakalarının oluşumları arasındaki fark Şekil 5.20'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 5.20 Ergiyik tabakaların gelişimi

Bu etki, ince malzemelerde, kaynak kesidinin ısı tesiri altındaki bölgesinde alışıl gelmiş saat camı şeklinin görüldüğü kalın malzemelere kıyasla daha az belli olur.

İstenilen dayanımda bir kaynak dikişi elde etmek için tüm karşılıklı yüzeyler üzerinde ergime sağlanması gereklidir. Aksi takdirde metal dışı kalıntılar kaynak merkezinde hapsolürler.

#### 5.2.1.1 Seçici Oksidasyon

Kaynak akımı ana metalde aktığı gibi ergiyik içerisinde de akar. Bu akım ergiyik metali kaynak üçgeni dışına itmeye eğilimli elektromanyetik kuvvetler üretir. Yüksek frekans akımının geçişi ayrıca ergiyik metal içerisinde karışma olmasına da yol açar. Karşılıklı yüzeyler üzerindeki karışmış haldeki ergiyik metal kaynak üçgeni çevresi ile reaksiyona girebilir. Çoğu kez çevre atmosferi hava, buhar disosiye haldeki su ve soğutma sıvısı yağlayıcı aditifinden meydana gelmiştir. En yaygın olarak gerçekleşen reaksiyon oksidasyondur. Alaşımı meydana getiren elementlerin hepsi oksijenle aynı oluşum enerjisi ile reaksiyona girmezler. Ergiyik metalin elektromanyetik kuvvetler ile karıştırılması,

elementlerin tümünü yüzeye getirdiğinden bu elementlerden oksijen ile en çabuk reaksiyona girenler ilk önce oksitlenecektir. Böylece ergiyik metalden en reaktif elementler çıkar ve bu olay seçici oksidasyon olarak isimlendirilir. Karbon ve sülfür gibi elementler buhar gibi oksitlenirler. Demir, mangan ve silisyum gibi elementlerin oksitleri kompleks oksitlerdir ve yüzeydeki ergiyik damlacıkları viskozduklar ve binme prosesi esnasında uzaklaştırılmaları da oldukça güç olduğundan bağ düzlemindeki metal dışı hatalar için iyi bir kaynak oluştururlar.

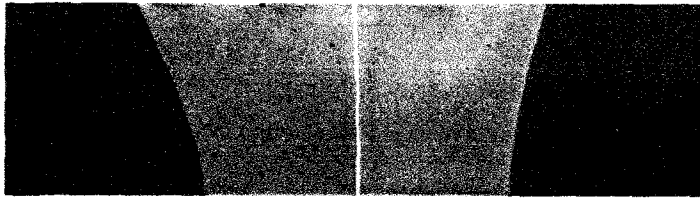
Relatif olarak yüksek ergime sıcaklıklarına sahip bazı oksitler çok küçük katı parçacıklar halinde ergiyik metal yüzeyini kaplar ve yeter miktara ulaştıklarında ergiyik metalin yüzey gerilimi aşırı derecede arttırabilirler.

Kaynak bölgesi çevre atmosferini değiştirmek yüzey reaksiyonlarının etkileyebilir. Reaktif metallerde kaynak bölgesindeki soğutma sıvısı ve havanın asal gaz ile uzaklaştırılmasıyla çok kaliteli kaynak dikişleri elde edilmiştir (Oppenheimer, 1997).

### 5.2.1.2 Beyaz Kaynak Hattı

Karbon-mangan çeliklerinden üretilmiş boruların metallografik kesitleri tipik bir beyaz kaynak hattı gösterirler. Beyaz kaynak hattı ince ve üniform olduğunda iyi bir kaynak işleminin işaretidir. Beyaz kaynak hattının oluşmasının sebebi manganın seçici oksidasyonudur.

Beyaz kaynak hattı ferritik yapıda olup ana malzemeye kıyasla daha düşük karbon oranına sahiptir. Kaynak boyunca mikrosertlik bantları ana malzemeye kıyasla daha yumuşaktırlar. Meydana gelen dekarbürizasyon, karbon kaybına değil manganın kaybına bağlıdır.



Şekil 5.21 Beyaz kaynak hattı Ø 323,9 x 7,0 mm, Malzeme X-52 ,  $V_0 = 25$  m/dak , Dört indüktörlü normalizasyon

Yüksek frekans direnç kaynağında manganın oksidize olduğu daha önce açıklanmıştı, böylece binme prosesi yönünde, yeniden katılaştıran sıvı metalin bu kısmı manganca fakirleşmiş olmaktadır.

Kaynak alanı soğuduğunda önceden ergimiş malzemedeki karbon konsantrasyonu ana metale kıyasla daha düşüktür bu da beyaz kaynak hattı tabakasını oluşturur.

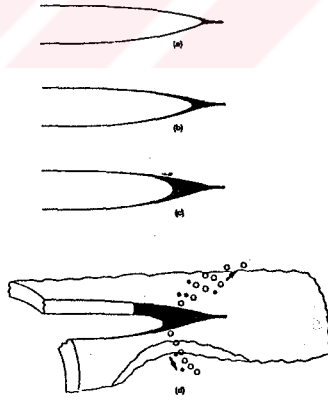
Kaynak işlemi sonrasında uygulanan normalizasyon işlemi manganı beyaz hatta geri getiremez ama yapılan deneylerde, kaynak dikişinin 1200°C sıcaklıkta 2 saat boyunca tutularak manganın yeniden difüzyonu sağlandığında beyaz kaynak hattının gözden kaybolduğu tespit edilmiştir. Karbon-mangan çeliklerinin asal gaz atmosferi altındaki kaynağında beyaz kaynak hattının olmadığı kaliteli kaynak dikişleri elde edilebilir (Oppenheimer, 1997).

### 5.2.3 Sıvı Metal Püskürmesi

Sıvı metal püskürmesi olarak adlandırılan olay, katı yüzey oksitleri oluşturan metallere ortaya çıkan, kaynak üçgeni boğazındaki sıvı metal kararsızlık halinin bir sonucudur. Bu kararsızlık halinden dolayı metal damlacıkları püskürmesi ortaya çıkar ve bağ düzlemi inklüzyonları oluşabilir.

Bu periyodik kararsızlık halini açıklamak için en iyi yol, adım adım tek bir çevrimin incelenmesidir;

Çevrim Şekil 5.22-a'da gösterildiği gibi metalin püskürtülmesinden hemen sonra başlar. Bu esnada boğazdaki ergiyik metal miktarı en düşük seviyededir. Kaynak üçgeni en uzun boyunda olup ergiyik metalin oksit kaplanmış yüzeyleri yaklaşmış ve kaynak üçgeni boğazında birleşmişlerdir.



Şekil 5.22 Ergiyik metal püskürmesi çevrimi

İkinci aşama Şekil 5.22-b'de görüldüğü gibi menisküsün ergiyik metalle dolmasıyla başlar. İki kenardan gelen ergiyik metalin birleşmesiyle oluşan nokta şimdi kaynak boğazında bir radyus oluşturarak ve kaynak üçgenini kısaltarak hareket etmektedir. Bu sırada oksitler yüzeyi kaplamaya ve yığılmaya devam etmektedirler.

Kaynak üçgenin kısılması genellikle iş parçasındaki diğer olası elektriksel yollara kıyasla, kaynak üçgeni içerisindeki empedansın düşmesine bağlı olarak kaynak üçgeni içerisinde geçen kaynak akımındaki bir artışı da beraberinde getirir. Akımın artması daha hızlı ısınma ve ergimeye yol açar böylece menisküs hızla büyür.

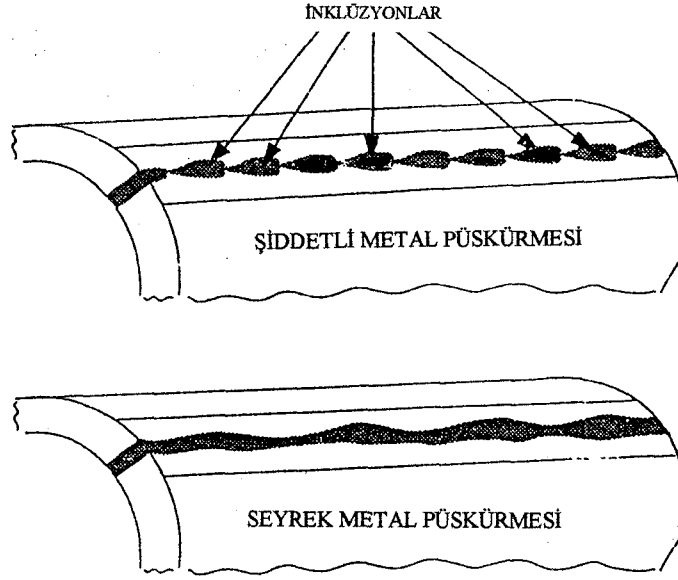
Üçüncü aşamada Şekil 5.22-c'de de görüldüğü gibi menisküs bir önceki durumuna göre malzeme akış yönünün tersinde daha da ilerlemiş ve daha büyük bir radyus oluşturmuştur. Akım kaynak üçgeninin bir yanından girip diğer yanından çıkarken boğazda bir döntüş yapar. Ergiyik metal içinden geçen akımın oluşturduğu elektromanyetik kuvvetler menisküs üzerinde menisküsün şişmesine yol açan bir basınç meydana getirirler. Bu esnada sıvı metal üzerindeki oksit tabaka menisküsün bozulmadan kalması için yeterli yüzey gerilimini sağlamaktadır. Çevrim ilerlemesiyle menisküsün radyusunun büyüklüğü ve elektromanyetik basıncın yüksekliği karşısında yüzey gerilim direncinin menisküsün kopmasına engel olamadığı bir safhaya gelir ve bu noktada menisküs yırtılır (Şekil 5.22-d).

Sıvı metal damlacıkları çoğu kez malzeme akış yönünde olmakla beraber içe ve dışa doğru püskürür. Sıvı metalin viskozitesi ve yüzey gerilimine bağlı olarak bu damlacıklar toz zerreciği kadar ufak olabildikleri gibi relatif olarak büyük de olabilirler. Sıvı metalin büyük bir kısmı dışarı atıldıktan sonra menisküs bozularak Şekil 5.22-a'daki hale geri döner ve çevrim kendini tekrarlar.

Bu çevrim frekansı ve etkilerinin şiddeti, kaynak üçgeni tepe açısı, meydana gelen oksit tipi ve miktarı, ergiyik metalin viskozitesi kaynak akımı ile belirlenen, karşılıklı yüzeyler üzerinde elde edilen ergiyik metal debisine bağlıdır.

300 serisi paslanmaz çelikler üzerinde yapılan bir dizi deneyde, 25,4 mm çap, 1,27 mm et kalınlığındaki borunun yaklaşık 30,48 m/dak hızla kaynağında, sıvı metal püskürmelerinin oluşma frekansı 20-300 çevrim/sn olarak ölçülmüştür. Asal gaz kullanımı ve soğutma sıvısının kaynak bölgesi dışına yönlendirilmesinin ergiyik püskürmesi şiddetinin azalmasında çok büyük etkisi olmuştur (Oppenheimer, 1997).

Şekil 5.23-a'da çok şiddetli metal püskürmesi şartları altında üretilmiş 300 serisi paslanmaz çelik borunun şematik tanjant kesidi gösterilmiştir. Metal püskürmeleri sonucu meydana gelen yapılar, damla halinde katılmış metal şeklinde görülmekte ve dendritik yapıları sayesinde kolayca fark edilebilmektedirler.



Şekil 5.23 Ergiyik metal püskürmesi sonucu meydana gelen dikiş formu

Metallerin tümünde katılmış ergiyik malzeme ile ana malzeme görünüşleri arasında bu kadar açık bir fark yoktur. Pirinç ve östenitik paslanmaz çeliklerde ise özellikle belli olur.

Bağ düzlemi inklüzyonu iki yerde oluşur. Bunlardan ilki yetersiz ergiyik metalin oluştuğu ve bu nedenle bağ düzlemi metal dışı parçacığının hapsedildiği yumrunun ince kuyruk kısmı, ikincisi ise yetersiz binmenin meydana geldiği yumrunun en geniş yeridir. Metal püskürmesinin meydana geldiği tüm birleşmelerde inklüzyon oluşmaz fakat yassılma testi uygulandığında küçük bağ düzlemi metal dışı kalıntıları gözlemlenir.

Şekil 5.23-b'de yumuşak metal püskürmesi gösterilmiştir. Püskürmenin sürekli olduğu rahatça görülebilir. Kaynak esnasında metal püskürmesi miktarındaki gözle görülebilen bir değişme üniform olmayan bant genişliği ya da kaynak merdaneleri ekzantrikliği gibi malzeme veya kaynak hattı kökenli sebeplere bağlıdır. Bundan dolayı metal püskürmesi miktarının bir an için gözden kaybolacak kadar azalması ve diğer bir anda aşırı fazlalaşması çoğu zaman gerçekleşebilen bir durumdur.

Püsküren metal kaynak merdanelerine veya diğer mekanizmalara yapışarak yığılma yapabilir. Normal olarak metalin püskürürken izlediği yol, metalin kontaklarda bir yığılmaya sebep olmasını önlese de bazı hallerde bu durum meydana gelebilir ve bu da kaynak akımının kısa devre yapmasına yol açabilir. Merdane yüzeylerine yapışan büyük metal parçacıkları boru üzerinde çukurcuklar açabilir ve ayrıca iç kazıma bıçağı taşıyıcı altına girerek bıçağın dalma yapmasına yol açabilir.

Ergiyiği üzerinde katı oksitler oluşmadığı kabul edildiğinden karbon-mangan çeliklerinde sıvı metal püskürmesi olayının görülmediği söylenebilir.

Haga, v.d.(1979) yaptıkları bir çalışmada kaynak üçgeni içerisinde periyodik bir oluşum tanımlamışlar ve kaynak üçgeninin kısılmasıyla içerisindeki empedansın değişmesine bağlı bir kararsızlık durumuna atıf yapmışlardır (Oppenheimer,1997).

Sıvı metal püskürmesi sonucu oluşan yapıyı incelerken, osilatöre bağlı güç kaynağındaki ufak elektriksel dalgalanmalar sonucu meydana gelen ve elektriksel noktalama olarak adlandırılan olay ile karıştırmamak gerekir. Noktalamanın frekansı hat frekansı ile belirlenir ve nümerik değeri her zaman güç hattı frekansının mantıklı bir katıdır.



## 6. YÜKSEK FREKANS KONDÜKSİYON ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAKLI ÇELİK BORU ÜRETİMİNDE KARŞILAŞILAN YAYGIN KAYNAK HATALARI

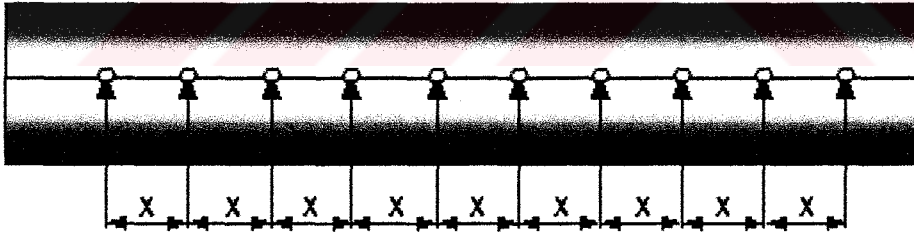
Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı çelik boru imalatında meydana gelen kaynak hatalarını açıklarken çoğu zaman gerçek resimler yerine idealleştirilmiş şemalar kullanılmış, böylelikle anahtar karakteristiklerin daha iyi tanımlanabilmesi ve kaynak parametrelerinin herhangi bir ayarına bağlı spesifik hatalarla araştırmanın karıştırılmasının önlenmesine çalışılmıştır. Hatalar adlandırılırken kimi zaman daha iyi anlaşılabilmesi için hata oluşum sebeplerinden yararlanılmıştır. Hataları meydana getiren olası sebepler açıklanmış ve önleme çareleri de verilmiştir.

### 6.1 Yaygın Kaynak Hataları

Açıklanan hataların dışında da kaynak hataları vardır fakat bu başlık altında sadece oluşum presipleri tam olarak tespit edilebilen ve standartlaştırılabilen 7 hata tipine değinilmiştir.

#### 6.1.1 Noktalama

Düzenli aralıklarla oluşan sürekli ve genelde nüfuziyetsizlik şeklindeki bir hata türüdür. Belirli bir kaynak hızında bu hatalar hat güç kaynağı frekansının katları şeklinde aralıklarla meydana geliyorsa elektriksel bir problem vardır.



Şekil 6.1 Noktalama

Örnek : 32 m /dak hat hızında Dış Çap : 323,9 mm , Et Kalınlığı : 7,1 mm X-52 malzemenin 400 kHz vakum tip osilatörlü bir sistemdeki kontakt kaynağında 450 mm'lik bir hata düzlemi üzerinde  $x = 8$  mm olarak ölçülmüştür.

32 m / dak = 32.000 mm / dak

32.0000 / 8 = 4000

f : 50 Hz

4000 / 50 = 80 Elektriksel bir problem var.

Meydana gelen hatanın sebebi osilatöre bağılı güç kaynağındaki ufak elektriksel dalgalanmalardır ve bu dalgalanmalar filitre edilerek önlenbilir..

Kimi zaman oluşum frekansı hat frekansının katlarıyla eşleşmeyen fakat noktalama ile benzer görünümde hatalar ile karşılaşabiliriz. Bu durumda meydana gelen hataların aralığı, periyodik hareketi hata oluşmasına sebep olan deforme olmuş bir merdane veya şaft çevresine eşit olacaktır.

Öncelik sırası kaynak, finpas ve kafesleme merdaneleri olmak üzere gerekli kontroller yapılırsa deforme olmuş merdane veya şaft kolaylıkla tespit edilebilir.

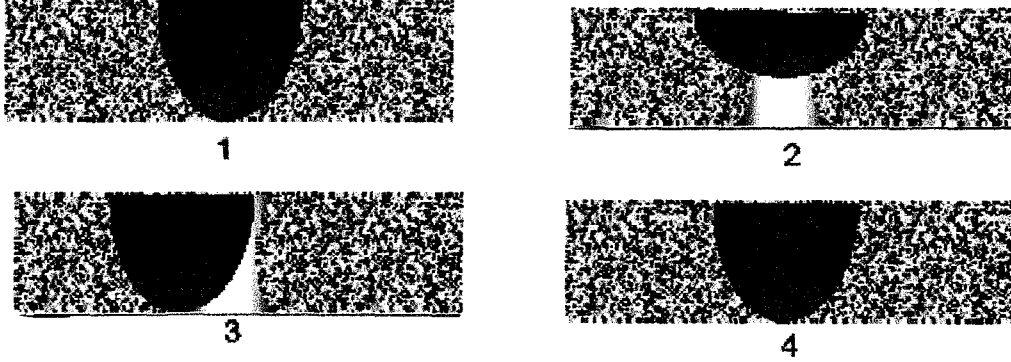
Bu tip bir hata sadece kaynak bölgesiyle sınırlandırılmaz, çoğu zaman boru yan yüzeylerinde toleransların dışına da çıkabilen periyodik izler ve oyuklarla karşılaşırız. Bu durumda söz konusu olan “çapak batması” olarak isimlendirilen bir hata türüdür. Merdanelerin aşınmasından dolayı, sistem içindeki çapakların veya diğer yabancı maddelerin merdane üzerine yapışması ve boruya periyodik hasar vermesi durumudur. Bu hatanın periyodu merdane çevre ölçüsüne eşit olacaktır.

### 6.1.2 Kaynak Dikiş Bölgesinde Martenzitik Yapı Oluşumu

Kaynak sonrası normalizasyon işleminde ortaya çıkan her hangi bir yetersizlik, kaynak sonrası ani soğumadan dolayı meydana gelen martenzitik yapının tamamen veya kısmen giderilememesi ve ilerleyen safhalarda çatlak oluşumu olarak karşımıza çıkar.

Proses gereği normalizasyon işlemi sonrasında hatta ilerleyen boru 50-60 m’lik bir serbest soğuma bölgesine girer buradaki amaç son şekilendirmenin yapıldığı kalibrasyon ünitesi öncesinde, kaynak ve boru sıcaklığının uygun bir değere düşürülmesidir. Kalibrasyon merdaneleri öncesindeki hat suyula soğutma bölgesine gelmeden önce dikiş sıcaklığının tavsiye edilen kritik sıcaklık olan 650° C’ye inmesi gerekir. Aksi takdirde çatlak oluşumu kaçınılmaz olacaktır. Uygulamada hat soğutma suyu uygulanmadan önce dikiş sıcaklığının

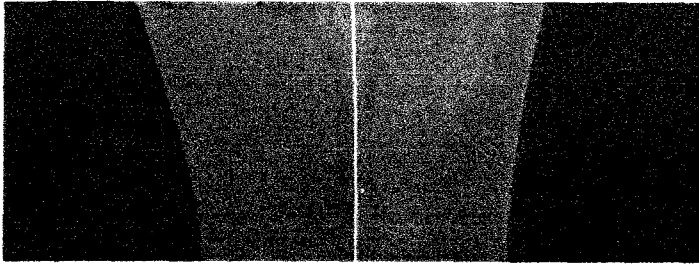
375°C'nin altına serbest soğuması sağlanarak, ısıl şok sonucu meydana gelebilecek distorsiyonların önlenmesine çalışılır.



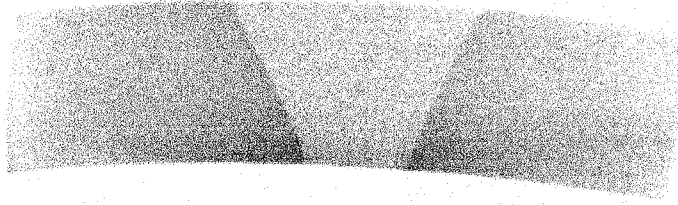
Şekil 6.2 Normalizasyon uygulamaları

Şekil 6.2-1'de doğru uygulanmış bir normalizasyon işlemi görülmektedir. Normalizasyon tüm et kalınlığı boyunca nüfuz etmiş ve kaynak dikiş bölgesinin tamamını içine almıştır. Şekil 6.2-2'de yanlış mekanik veya elektriksel ayardan dolayı gerçekleşen yetersiz normalizasyon nüfuziyeti görülmektedir. Şekil 6.2-3'de normalizasyon nüfuziyeti derinliği uygun ama normalizasyon merkezden kaçıktır ve kaynak bölgesinde tavlınmamış bölgeler kalmıştır. Bunun sebebi borunun dönme yaparak kaynak dikiş bölgesinin indüktör merkezinden ayrılmasıdır. Şekil 6.2-4 aşırı yüksek normalizasyon sıcaklığına bağlı tane büyümesini göstermektedir. Tane büyümesi kaynak dikiş mukavemetini ve kaynak bölgesi korozyon dayanımını düşürür.

Normalizasyon sonrasında beyaz kaynak hattı nispeten silik gözükür kimi zaman ise tamamen yok olur.

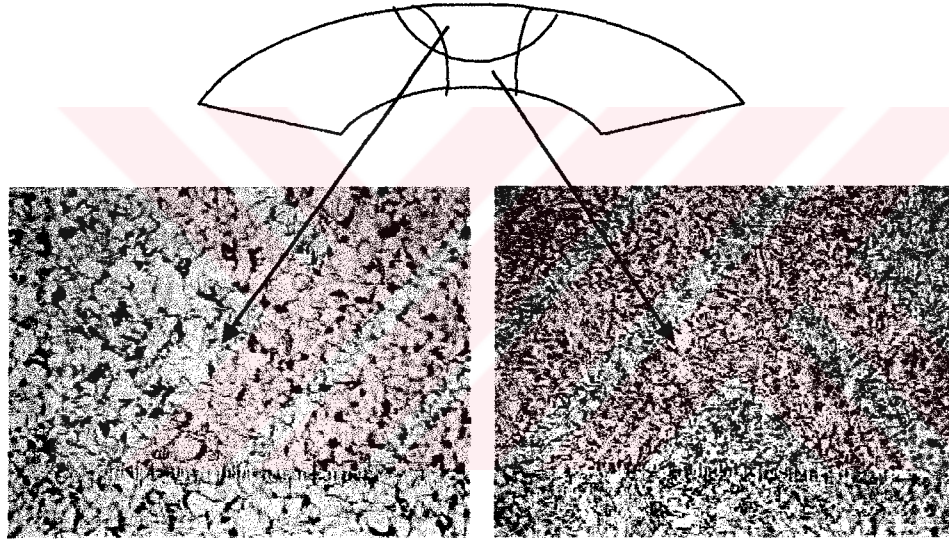


Şekil 6.3 Dört kademeli normalizasyon işlemi sonrasında kaynak bölgesi görünümü  
Ø 323,9 x 7,0 mm, X-52 malzeme, kaynak hızı 25 m/dak



Şekil 6.4 Dört kademeli normalizasyon işlemi sonrasında kaynak bölgesi görünümü  
Ø 273 x 5,0 mm, X-52 malzeme, kaynak hızı 30 m/dak

Şekil 6.4'de normalizasyon işlemi sonrasında beyaz kaynak hattı halen görülmekte ve borunun dönmesinden dolayı normalizasyonun merkezden biraz kaçık ama tam nufüzyette gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



X-400 Normalizasyon uygun  
Ferlitik perlitik yapı

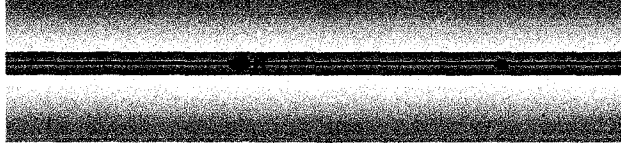
X-400 Normalizasyon nufüzyeti düşük  
Martenzitik yapı

Şekil 6.5 Normalizasyon sonrası mikro yapılar, Ø 323,9 x 7,0 mm, Malzeme X-52

### 6.1.3 Porozite

Kaynak bölgesinde meydana gelen küçük küresel gaz boşlukları şeklindeki hatalardır.

Dış kazıma işleminden sonra bu delikler birleşme hattı üzerinde kolaylıkla gözlemlenebilir.



Şekil 6.6 Dış kazıma işleminden sonra porozite görünümü



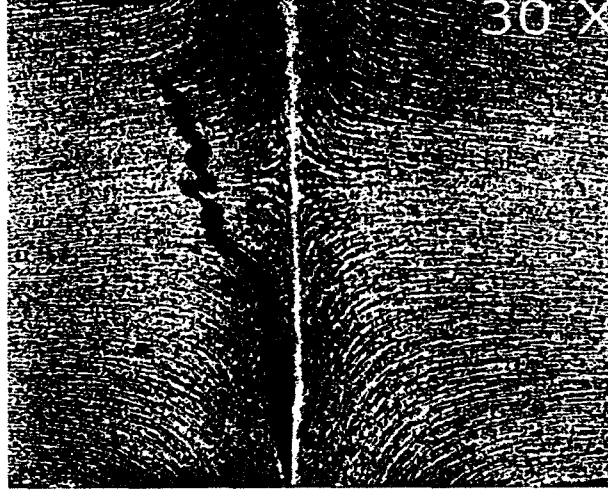
Şekil 6.7 Kaynak dikiş bölgesinde sıkışmış gaz boşlukları

Gaz boşlukları kaynak bölgesinde aşırı ısınma sonucu meydana gelirler. Normal kaynak işleminde uygun fişkırmayla kaynak dikişinde kalmaları önlenmiş olur. Dar bant kullanılması fişkırmayın yetersiz olmasına sebep olabilir. Uygun bant genişliği kullanımı veya mümkünse verilen ısı miktarını düşürme yoluyla bu hatanın oluşması önlenir.

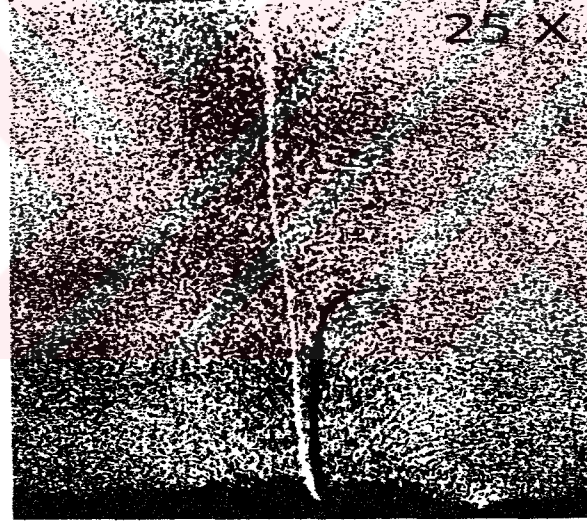
#### 6.1.4 Kanca Çatlaklar

Kanca çatlaklar, metaldeki binme akış çizgilerini izleyen, bağ düzlemi kenarında yer alan ve genişletme veya yassılma testinde tespit edilebilen, uzun kanca şeklindeki yüzey çatlakları olarak tanımlanabilir. Kanca çatlaklar, kaynak hataları değil laminasyonlara bağlı malzeme tabanlı hatalardır. Boru malzemesindeki mevcut laminasyonlar yüksek merdane basınçları altında açılabilir ve binme prosesinde bant kenarındaki lif ve inklüzyon tabakalarının dışa doğru dönmesiyle kanca çatlaklar meydana gelir. Kanca çatlakların büyüklüğü fişkırmayla belirlenir. Fişkırmayla miktarı arttıkça meydana gelen çatlak boyutları büyür. Çatlak boyu genelde et kalınlığının 1/3'ü ile 1/2'si arasında değişir. Bant dilme payının artırılmasıyla kanca çatlakların azaldığı tespit edilmiştir (Martin, 1962).

Fişkırtma basıncını ve/veya bant genişliğini azaltmak ve çelik kimyasal yapısını düzeltmek gibi önlemlerle kanca çatlak oluşumu engellenebilir.



Şekil 6.8 Ø 304,8 x 4,6 mm boruda meydana gelen kanca çatlak, malzeme X-42,  
(Martin, 1962)



Şekil 6.9 Ø 254 x 5,1 mm boruda meydana gelen kanca çatlak, malzeme X-42 (Martin, 1962)

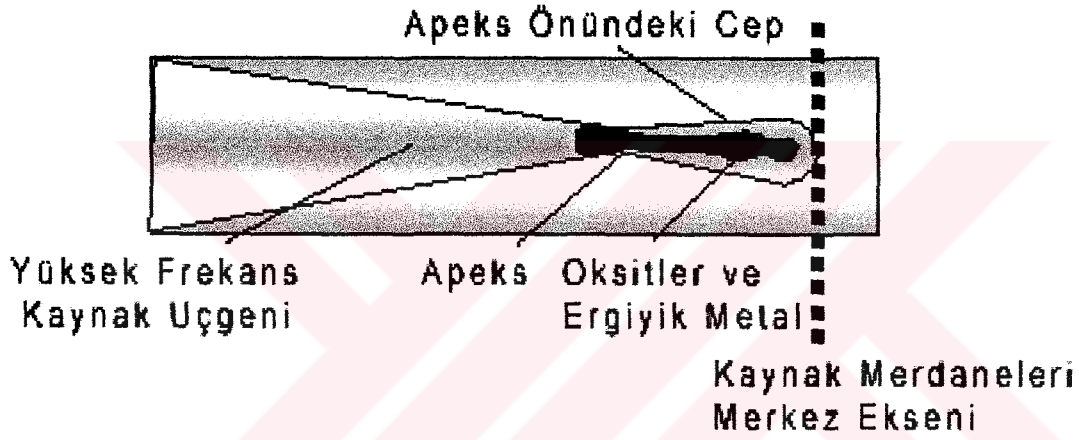
#### 6.1.5 Kaynak Dikişinde Tam Nüfuziyetsizlik ( Açık Dikiş )

Bu hata bant kenarlarının kaynamaması sonucu, kaynak merdaneleri sonrasında belirsiz uzunlukta açık boru formunun meydana gelmesi olarak tanımlanır. Sebepleri; Düşük ısı (güç), yüksek kaynak hızı, uzun kaynak üçgeni, düşük fişkırmaya basıncı, dar bant kullanımı, bant kenarlarının kaynak üçgenine paralel yönelmemesi veya tüm bunların kombinasyonu olarak verilebilir.

Bu tip hatanın önlenmesi, kaynak gücünün yükseltilmesi, hat hızının düşürülmesi, kaynak merdaneleri basıncının arttırılması veya bant genişliğinin ayarlanmasıyla sağlanabilir.

#### 6.1.6 Kaynak Dikişinde Metal Oksit Sıkışması

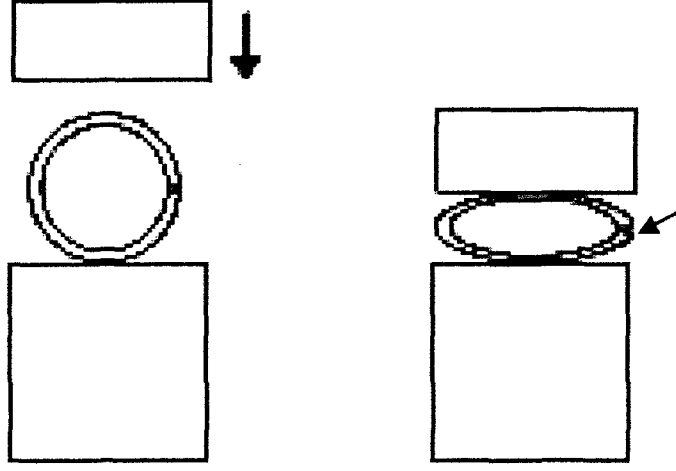
Bu hata metaloksitlerin ergimiş metalle birlikte dışarı atılmayıp birleşme düzlemi içerisinde sıkışıp kalması sonucu ortaya çıkar. Kaynak işlemi esnasında ergimiş bant kenarları yüzeylerinde metal oksitler meydana gelir. Kaynak üçgeni içerisindeki bant kenarlarının yaklaşma hızı ergime hızından düşük ise, yani fişkırtılan ergimiş metal debisi, ergiyerek bu bölgede oluşan metal debisinden düşük ise kaynak üçgeni boğazı önünde hem ergimiş metal hem de metaloksitleri içeren bir cep oluşur.



Şekil 6.10 Metal oksit sıkışmasının prensibi

Normal fişkırtma belirli bir sıvı metal hacminden fazlasını dikiş bölgesinden uzaklaştıramayacağından kaynak merdanelerinden geçişte metal oksit sıkışması meydana gelecektir.

Yassılma testinde kaynak dikişi açma yapar ve mevcut oksit sıkışması kolaylıkla gözlemlenebilir.



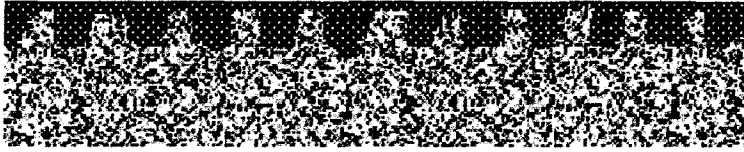
Şekil 6.11 Yassılma testinde borunun yırtılması

Sıkışan metaloksit yüzeyi genellikle koyu renktedir ve kaynak hattı yüzeyine kıyasla oldukça düzdür.



Şekil 6.12 Kaynak bölgesinde münferit metal oksit sıkışması

Bu hatalar münferit olarak ortaya çıkabilecekleri gibi diziler halinde de meydana gelebilirler.



Şekil 6.13 Kaynak bölgesinde dizi halinde metal oksit sıkışması

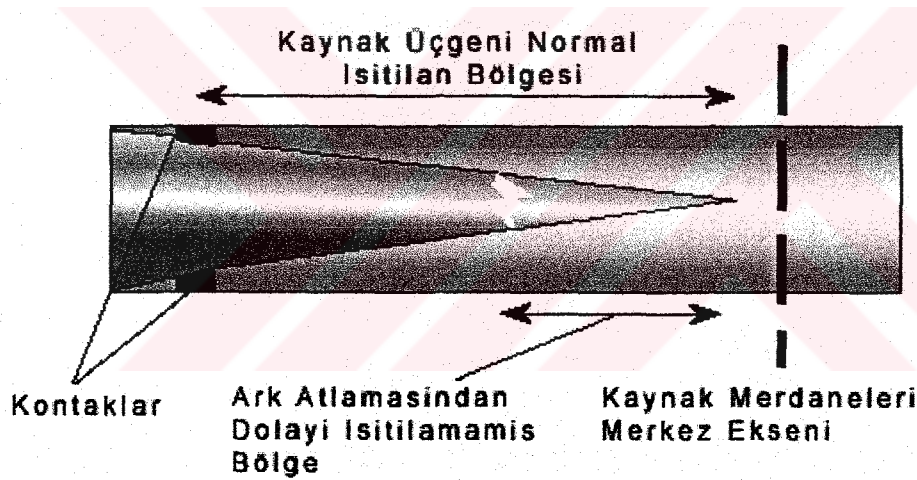
Yapılan çalışmalarda kaynak üçgeni tepe açısı darlaştığında örneğin  $p < 4^\circ$  değerleri için ve boru malzemesi Si/Mn oranı 1/8'den daha az olduğunda metal oksit alanın artığı gözlemlenmiştir (Nichols, 1996).

Kaynak bölgesinde metal oksit sıkışmasından kaçınmak için, kaynak üçgeni tepe açısının  $4^\circ < p < 6^\circ$  aralığındaki değerleri ile çalışmak, tüm hat ayarlarının uygun seçilmesi, sabit bir kaynak üçgeni yüksekliğinin sağlanması, sağlam bir kaynağı oluşturacak minimum kaynak sıcaklığı ile çalışmak, Si/Mn oranı  $1/8$ 'den düşük çelikler kullanılması gerekir.

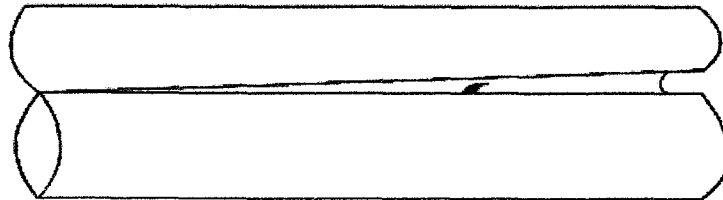
### 6.1.7 Ark Atlaması

Bu hata tipinde kaynak dikiş bölgesi içerisinde sıkışan herhangi bir yabancı madde olmamasına karşın bir nüfuziyetsizlik söz konusudur.

Bant kenarlarının uygun dilinememesi sonucu ortaya çıkan kıymıklar veya kirlili hat soğutma suyu ve diğer yollardan kaynak bölgesine gelen tufaller yüksek frekans akımının kaynak üçgeni apeksi önünde ani bir kısa devre yapmasına yol açar, böylelikle kaynak üçgeni içerisinde ısı kaybı oluşur.



Şekil 6.14 Ark atlaması



Şekil 6.15 Bant kenarında kalan kıymık

Kaynak bölgesinde bir kısa devre oluşması çoğu zaman boru et kalınlığından uzun olmayan bir hata meydana getirir. Yassılma testinde kaynak bölgesi kırılarak açıldığında kaynak alanının normal yapısı ile çevrili düz ve parlak yüzey kolaylıkla gözlemlenebilir.



Şekil 6.16 Ark atlaması sonucu oluşan yapı

Vakum tüplü kaynak makinalarında yaygın olan yüksek işlem voltajlarıyla yapılan kaynak işlemlerinde, kısa devreleri kolaylaştıracak tufal ve kıymıklar olmasa dahi ark atlamalarının ortaya çıkması olasıdır.

Ayrıca dikiş kılavuzu izolasyonundaki herhangi bir kaçak ark atlamasına yol açabilir.

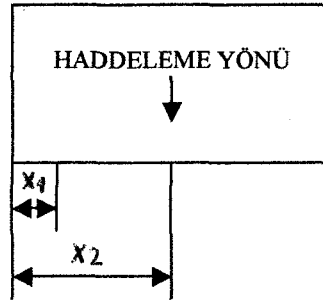
Ark atlamalarının önlenmesi için, kaynak üçgeni tepe açısını  $4^\circ < p < 6^\circ$  aralığında tutmak, kıymık oluşumunu önlemek için dilme prosesinde önlemler almak, bant kenarlarının bilhassa dilme tezgahından bant açma ünitesine taşınması esnasında (hatta dilme yapılmıyorsa) hasar görmesini engellemek, soğutma suyunun kaynak bölgesine iletken parçacıklar getirmesini önlemek için filitrelenmesine ve kaynak üçgeni dışına yönlendirilmesine dikkat etmek gereklidir.

## 6.2 Diğer Deneysel Çalışmalar ve Gözlemler

Bölüm 6.1'de bahsedilen yaygın hataların dışında, kaynak dikiş kalitesinin yükseltilmesi için özel durumlar ve örnek olayların incelenmesi de faydalı olacaktır.

Ek bölümde, tespit edilen kılcal çatlaklar ve mikroyapı fotoğraflarından örnekler verilmiştir.

İngot dökümde meydana gelen karbon segragasyonu ve haddeme sonrasında segragasyonların yayılarak bant ortasında karbon oranının artması durumundan ve sürekli döküm mamülü bantlarda ise bu olayın meydana gelmediğinden Bölüm 4'de bahsedilmişti. Bu olayı ispat için 1310 mm genişlik ve 6,40 mm et kalınlığındaki, X-52 malzemedan, bazik oksijen ve sürekli döküm yöntemiyle imal edilmiş çelik banttan alınan numuların spektrometre analizi ile, kenar ve merkezde karbon segragasyonu ile diğer şarj analiz değerlerinden sapmalar kontrol edildi.



Şekil 6.17 Kimyasal analiz numune yerleri

Çizelge 6.1 X-52 Malzemedan alınan ortalama kimyasal analiz % değerleri

Numune yeri	C	Mn	P	S	Si	Al	Nb
Bant Kenarı $x_1 = 12,5 \text{ mm}$	0,098	0,996	0,002	0,004	0,211	0,027	0,038
Bant Ortası $x_2 = 655 \text{ mm}$	0,096	1,059	0,002	0,005	0,209	0,025	0,042

Çizelge 6.2 X-52 Malzeme için üretici firma pota analizi % değerleri

C	Mn	P	S	Si	Al	Nb
0,105	1,04	0,012	0,008	0,200	0,021	0,040

Meydana getirilen tabloların incelenmesiyle, kimyasal analizin malzemenin her bölgesinde farklı olabileceği fakat alınan numuneler için, malzeme döküm analizi ile normalin dışında sapma olmadığı tespit edilmiştir. Bölüm 3’de bahsedilen karbon segragasyonunun sürekli döküm yönteminde ortaya çıkmadığı açıkça görülmektedir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Önceki bölümlerde yapılan teorik ve deneysel analizlerde kaynak kalitesinin optimizasyonu için neler yapılması gerektiği anlatılmıştır.

Proses parametreleri ve ürün kalitesi arasındaki anahtar ilişkilerin anlaşılmasıyla fire oranlarında önemli düşüşler elde edilebilir. Nihayi ürün maliyetinde hammadde giderleri, fire oranındaki azalmanın aynı oranda boru birim maliyetlerine etki edeceği kabul edilecek kadar önemli yer tutmaktadır.

Yüksek frekans kondüksiyon elektrik direnç kaynaklı çelik boru imalatında üretim esnasında tespit edilebilen hatalar yalnızca fire oranımızı arttırmaktadır fakat özellikle gaz boru hatlarında ortaya çıkabilecek hatalar çok daha vahim sonuçlara yol açabilir.

Sürekli kalite kontrol, üretim prosesimizin vazgeçilmez bir parçası olmak zorundadır.

Hatanın doğru tespiti kadar zamanında tespiti de çok büyük öneme sahiptir. NDT uzmanlarının ve laboratuvar çalışanlarının hatayı en kısa sürede tanımlayabilecek, üretim personelinin ise hata oluşturan sebepleri derhal giderebilecek bilgi ve tecrübede olmaları gerekir.

Boru üretim hatları yüksek yatırımlar gerektirmekte ve amortisman süreleri de oldukça uzun olmaktadır. Bu yüzden belirli bir işletme saatinden sonra özellikle hat mekanik ekipmanlarında aşınmalar ve buna bağlı olarak da kaynak hataları ortaya çıkacaktır. Kaynakta ortaya çıkan hataların büyük bir çoğunluğu, aşınmış merdaneler ve yataklar ile yanlış hat mekanik ayarlarına bağlıdır. Bilhassa kaynak merdaneleri baskı mekanizmasında meydana gelen aşınmalar ve şaftlarda meydana gelen ekzantrikliklerin kesinlikle hataya yol açacağı söylenebilir. Bu kökenli hatalardan kaçınmak için planı bakım sistemleri geliştirilmeli ve titizlikle uygulanmalıdır.

Normalizasyon işleminde ortaya çıkabilecek yetersizliklerden kaçınmak için indüktörler ve kaynak dikişi arasındaki mesafenin sürekli olarak kontrolü yapılmalı ve dikiş dönmesi olayına müsaade edilmemelidir.

Hattın ve soğutma sıvısının temizliğine dikkat edilerek, kaynak bölgesine yabancı malzeme girişi önlenmelidir.

Yüksek kaynak hızlarında yapılan çalışmalarda hata oluşumunda önemli düşüşler gerçekleştiğinden hızı arttırmak her zaman hedeflenmeli ve uygulanmalıdır.

Dilme payının arttırılması bant kenar yüzey kalitesinin yükselmesini sağlar. Dilme bıçakları değiştirilmeden sadece dilme payının arttırılmasıyla kaynakta hata oluşumunun önemli oranda düştüğü görülmektedir.

Her ne kadar maliyetleri arttırsa da geniş bantların kullanılması yoluyla fişkırmannın arttırılması bir çok hatanın kompenzasyonunu sağlar.

Metal püskürmesi gerçekleşiyorsa yığma yapmamasına dikkat edilmeli ve boru, hat ve diğer ekipmanlarda hasar meydana gelmemesi için tedbirler alınmalıdır.

Akma dayanımı üzerinde yapılan hidrottest, daha önce toleranslar içinde kalan çatlakların büyümesine sebep olarak borunun ret edilmesine yol açabilir.

Hat mekanik ayarlarına bağlı hatalar çoğunluktadır. Hat üzerinde üretilebilen her boyutta boru için kaynak hattının detaylı ayar cetvelleri hazırlanmalı ve yapılan her hangi bir değişiklik mutlaka kayıt edilmelidir ve kaynak hattı kendi standartlarını belirlemelidir.



**KAYNAKLAR**

Aslanoğlu, F.E., Gültekin, N., (2001) “Yüksek Frekans Kondüksiyon Elektrik Direnç Kaynaklı Çelik Boru Üretim Prosesi ve Yaygın Olarak Karşılaşılan Kaynak Hataları” MMO Kaynak Teknolojisi III.Ulusal Kongresi, 19-20-21 Ekim 2001, İstanbul, (Yayımlanmamış)

API, (2000), “American Petroleum Institute Specification 5 L”, Forty-second Edition January 2000, API Publishing, Washington D.C., USA

Bell, D.A., (1993), “Heat Treating Carbon Steel Tube”, Tube International May 1993, Puplex International Publishing, UK

Bell, D.A., (1993), “A New Integrated System for Pipe Weld Seam Normalizing – On Line or Off Line”, Thermatool Corporation Technical Paper 103, East Heaven, CT, USA

Bell, D.A., (1993), “The Practical World of Tube and Pipe Welding”, Thermatool Corporation Technical Paper 120, East Heaven, CT, USA

Bell, D.A., (1993), “Seam Annealing of Tubular Products”, Thermatool Corporation Technical Paper 124, East Heaven, CT, USA

Borger, J.C., (1993), “Internal Scarfing of Welded Steel Tube”, Tube International May 1993, Puplex International Publishing, UK

Böhler, (1996), “Tools and Indexable Inserts for Tube Machining”

Changcun, Y., (1996), “Metallographic Examination Evaluation Criteria and Control for ERW Pipe Production”, Tube International March 1996, Puplex International Publishing, UK

Enos, G.M., Fontaine, W.E., (1974), “Elements of Heat Treatment”

Hubbard, C., (1980), “High Frequency Contact and Induction Welding of Tube”, Fabricator January/February 1980, Fabricating Manufacturers Association Journal, Rockfor, IL, USA

Kaluç, E., Şirin K., ve Şirin Ş., (1997), “YF İndüksiyon Kaynaklı Borularda Yöntem Parametrelerinin Kaynak Dikiş Özelliklerine Etkisi”, MMO Kaynak Teknolojisi I.Ulusal Kongresi, 13-14-15 Kasım 1997, Ankara

Martin, D.C., (1962), “Causes of Defects in ERW Pipes”, Battelle Memorial Institute, USA

Mazzola, G., (1994), “Welding Steel Tube – Temperature Control”, Tube International July 1994, Puplex International Publishing, UK

Mazzola, G., (1995), “High Frequency Welding of Carbon Steel Tubes”, Tube International November 1995, Puplex International Publishing, UK

Morin, T.J., and Scott, P.F., (1996), “Modern Methods of High Frequency Welding to Produce Consistent Quality”, Thermatool Corporation Technical Paper 141, E.Heaven, USA

Nichols, R.K., (1995), “Tube & Pipe Making – Steel Mill Practices and their Effects”, Tube International January 1995, Puplex International Publishing, UK

Nichols, R.K., (1999), “High Frequency Welding – The Process and Applications”, Thermatool Corporation Technical Papers, East Heaven, CT, USA

Nichols, R.K., (1993), “The Metallurgical Effects of Weld Seam Heat Treating”, Thermatool Corporation Technical Paper 116, East Heaven, CT, USA

Nichols, R.K., (1996), “Common HF Welding Defects”, Thermatool Corporation Technical Paper 142, East Heaven, CT, USA

- Nichols, R.K., (1999), "Destructive Testing of Welded Steel Tubulars", Thermatool Corporation Technical Paper, East Heaven, CT, USA
- Openheimer, E., (1996), "Causes of Common Defects in High Frequency Welds Part I : Process Fundamentals", Tube & Pipe Technology July/August 1996
- Openheimer, E., (1996), "Causes of Common Defects in High Frequency Welds Part II : Weld Imperfections", Tube & Pipe Technology September/October 1996
- Openheimer, E., (1997), "Understanding High Frequency Weld Quality Part III : Molten Metal Phenomena", Tube & Pipe Technology May/June 1997
- Openheimer, E., (1997), "Causes of Common Defects in High Frequency Welds Part IV : Lamellar Tearing in High Frequency Resistance Welded Steel Pipe", Tube & Pipe Technology July/August 1997
- Openheimer, E., (1998), "Causes of Common Defects in High Frequency Welds Part V : Weld Heating Power Requirements from a Process Viewpoint", Tube & Pipe Technology May/June 1998
- Openheimer, E., (1998), "Understanding High Frequency Weld Quality Part VI : Summary and Troubleshooting", Tube & Pipe Technology September/October 1998
- Roberts, J., and Scott, P.F., (1994), "A Study of the Key Parameters of High Frequency Welding Part I", Thermatool Corporation Technical Paper 129, East Heaven, CT, USA
- Savage, T., (1990), "A Teoretical and Practical Approach to High Freuency of Large Diameter Tubes and Pipes – Contact or Coil ?", Electroheating International Ltd. Technical Paper, Bucley, WA, USA
- Scott, P.F., and Smith, W., (1993), "A Study of the Key Parameters of High Frequency Welding Part II", Thermatool Corporation Technical Paper 130, East Heaven, CT, USA
- Scott, P.F., (1996), "The Effects of Frequency in High Frequency Welding", Thermatool Corporation Technical Paper 138, East Heaven, CT, USA
- Topbaş, M.A., (1993), "Endüstri Malzemeleri I.Cilt", Prestij Yayınları, İstanbul
- Topbaş, M.A., (1993), "Endüstri Malzemeleri II.Cilt", Prestij Yayınları, İstanbul
- Thermatool Corporation, (1991) "Pipe Welding Handbook", Thermatool Technical Papers, East Heaven, CT, USA
- TSE, (1976), "TS 416 – Borular Dikişli (kaynaklı); Çelik, Genel Amaçlar İçin", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TSE, (1987), "TS 1997 – Borular Düz-Spiral Kaynaklı, Alaşımısız Çelik", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- Wright, J., (1999), "Optimizing Efficiency in HF Tube Welding Process", Tube & Pipe Technology November/December 1999

EK 1

**METALOGRAFİK İNCELEME**

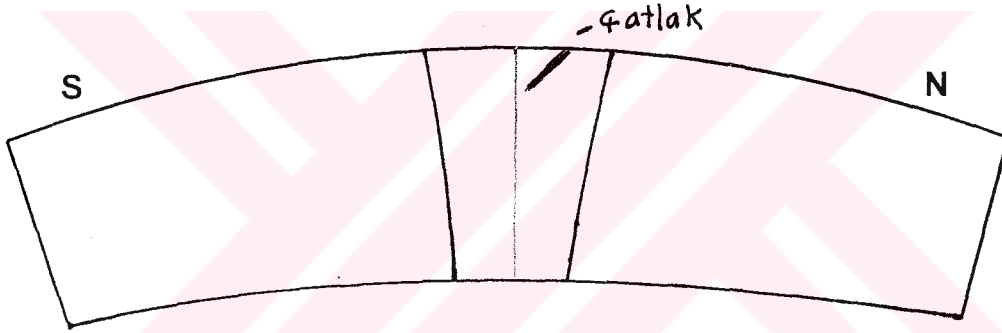
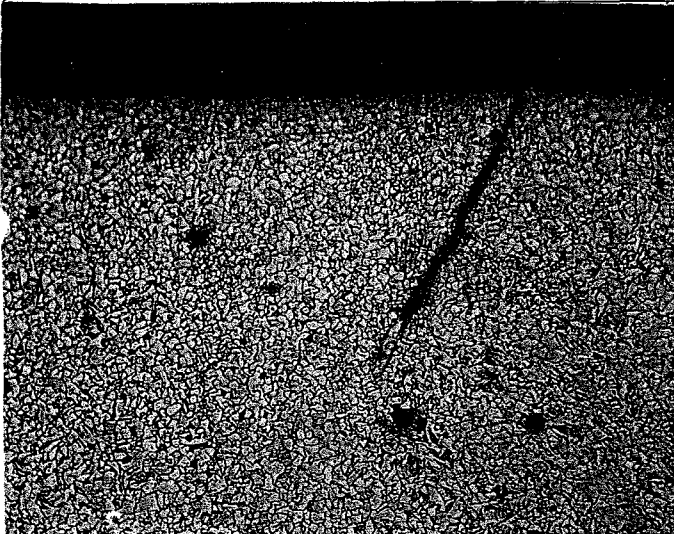
Metallographic Examination

Sipariş No. :

Order No. : 00/91

Hat No. MILL NO. <b>ERW II</b>	Tarih DATE <b>03.05.2000</b>	Vardiya SHIFT <b>08:00-18:00</b>	Çap SIZE <b>168,3</b>
Et Kalınlığı WALL THICK <b>4,37</b>	Boru No. PIPE NO. <b>AB.2854</b>	Kg. / mt WT / FT <b>17,66</b>	Bant No. COIL NO. <b>00/695B</b>
Çelik Kalitesi STEEL GRADE <b>Gr B</b>	Standart STANDARD <b>API 5L</b>	Döküm No. HEAT NO. <b>11087</b>	NDT İst. NDT STATION <b>85759</b>

**KAYNAĞA DİK KESİTTE GRAFİK GÖRÜNÜM**  
TRANSVERSE SECTION THROUGH WELD  
GRAPHIC DESCRIPTION

**ÖZELLİKLER - PARENT**

↑ Kaynak bölgesi X100

FERRITE GRAIN SIZE Ferrit Tane Ölç.	BANDING
CONDITION OF CARBON	INCLUSION RATING

**WELD**

POST ANNEAL		CARBON FREE LINE	
PENT.	NO. TOCCOS	WIDTH	EXTENT
%	1 2 3 4		
WELD FLASH			
Dış Taraf OUTSIDE		Diğer OFF - SET	

REMERKS **Diştan 3mm içeride 0,3mm boyutunda kılcal çatlak tespit edilmiştir.**  
Yorum

Hazırlayan : **M. ACAR**  
Prepared by

Onaylayan : **E. CANIGÜR**  
Approved by

EK 2

**METALOGRAFİK İNCELEME**

Metallographic Examination

Sipariş No. :

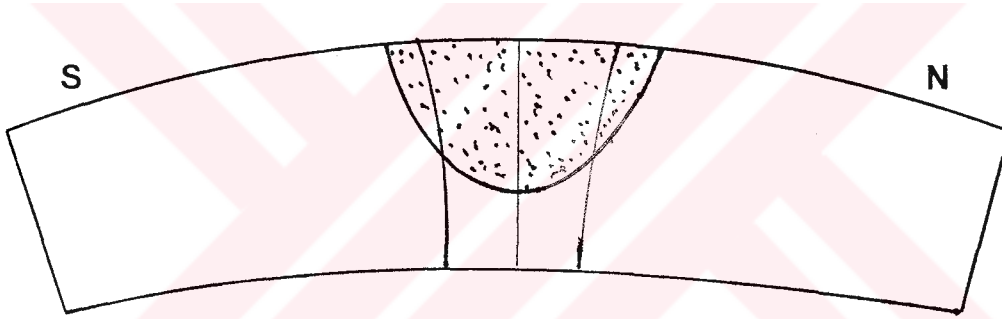
Order No. : 99/062


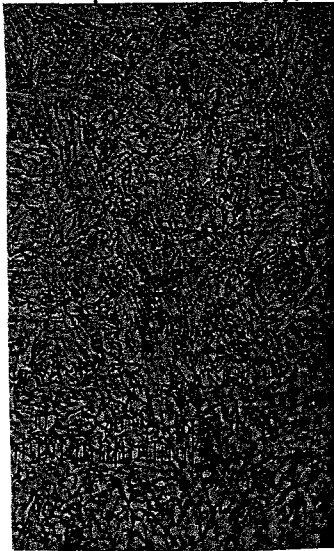
Hat No. MILL NO. <b>ERWI</b>	Tarih DATE <b>24.04.2000</b>	Vardiya SHIFT <b>08:00-18:00</b>	Çap SIZE <b>406,4</b>
Et Kalınlığı WALL THICK <b>10,30</b>	Boru No. PIPE NO. <b>—</b>	Kg. / mt WT / FT <b>100,61</b>	Bant No. COIL NO. <b>00/882</b>
Çelik Kalitesi STEEL GRADE <b>X-52</b>	Standart STANDARD <b>API 5L</b>	Döküm No. HEAT NO. <b>32725</b>	NDT İst. NDT STATION <b>85759</b>

**KAYNAĞA DİK KESİTTE GRAFİK GÖRÜNÜM**

TRANSVERSE SECTION THROUGH WELD

GRAPHIC DESCRIPTION

**ÖZELLİKLER - PARENT**

<b>Dış</b>	<b>X400</b>	<b>İç</b>	<b>X400</b>	FERRITE GRAIN SIZE	BANDING
				Ferrit Tane Ölç.	
				CONDITION OF CARBON	INCLUSION RATING

**WELD**

POST ANNEAL		CARBON FREE LINE	
PENT.	NO. TOCCOS	WIDTH	EXTENT
%	1 2 3 4		
WELD FLASH			
Dış Taraf		Diğer	
OUTSIDE		OFF - SET	

REMERKS **Dıştan 5mm sonrasında normalizasyon nüfuziyeti gerçekleşmemiş ve Martenzitik yapı tespit edilmiştir.**

Yorum

Hazırlayan : **M.ACAR**  
Prepared by

Onaylayan : **E.CANIGÜR**  
Approved by

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	15.04.1975	
Doğum yeri	Kocaeli	
Lise	1990-1993	Kadıköy Anadolu Lisesi
Lisans	1994-1998	Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1998-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği ABD İmal Usulleri Programı

**Çalıştığı kurumlar**

2000-2001	Ümran Çelik Boru A.Ş. Akçakoca Tesisleri Üretim Mühendisi / Planlama Müdürü
2001-Devam ediyor	Federal Mogul Dereli Holding Satınalma Mühendisi