

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK FREKANSLI İNDÜKSİYON KAYNAĞI YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
BOYUNA DİKİŞLİ ÇELİK BORULARDA KULLANILAN MİKRO ALAŞIMLI
MALZEMELERİN KAYNAK ZAYIFLIĞININ AZALTILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Serdar GÜNDOĞDU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

OCAK 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK FREKANSLI İNDÜKSİYON KAYNAĞI YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
BOYUNA DİKİŞLİ ÇELİK BORULARDA KULLANILAN MİKRO ALAŞIMLI
MALZEMELERİN KAYNAK ZAYIFLIĞININ AZALTILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet Serdar GÜNDOĞDU
(503091322)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Celaletdin ERGUN

OCAK 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503091322 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ahmet Serdar GÜNDOĞDU** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“YÜKSEK FREKANSLI İNDÜKSİYON KAYNAĞI YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN BOYUNA DİKİŞLİ ÇELİK BORULARDA KULLANILAN MİKRO ALAŞIMLI MALZEMELERİN KAYNAK ZAYIFLIĞININ AZALTILMASI”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Celaletdin ERGUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Şafak YILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **19 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **31 Ocak 2012**

Emeği geçen herkese,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın oluşmasında bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan değerli hocamız Doç. Dr. Celaletdin ERGUN'e, bana yardımlarını esirgemeyen Adnan DOĞANAY ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen annem ve aileme sevgimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2011

Ahmet Serdar GÜNDOĞDU
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1 Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı	3
2.2 Yüzey Etkisi	4
2.3 Yakınlaşma Etkisi	5
3. METALLERDE DAYANIM ARTTIRICI MEKANİZMALAR	7
3.1 Alaşımlama ile Dayanımın Arttırılması	7
3.1.1 Alaşım elementlerinin çeliğe etkisi	8
3.1.2 Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler	13
3.1.2.1 Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik üretimi	18
3.1.2.2 Ara yer fazlarının kararlılığı.....	22
4. KAYNAK KALİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER	25
4.1 Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı Sürecinin Matematiksel Modeli	25
4.2 Düşük Karbonlu Çeliklerin YF Kaynağı.....	34
4.3 Kaynaklanabilirlik	35
4.4 Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı Kaynak Hataları	37
4.4.1 Tutulmalar (Siyah kalıntılar).....	38
4.4.2 Ön arklar (Beyaz kalıntılar)	39
4.4.3 Eksik ergime (Açık kaynak)	39
4.4.4 Köşelerde eksik ergime (Büzüşme)	40
4.4.5 Merkezde soğuk ergime (Soğuk merkez)	41
4.4.6 Yapışık kaynak (Soğuk kaynak)	41
4.4.7 Döküm kaynak	42
4.4.8 Porozite (İğne deliği)	43
4.4.9 Kademeli kaynak zayıflığı	43
5. TEST VE MUAYENELER.....	45
5.1 Tahribatlı Muayeneler	45
5.1.1 Enine kaynak alanı doğrulama metodu	45
5.1.2 Yassılma testi	46
5.1.3 Genişletme testi.....	47
5.1.4 Katlama testi	47
5.2 Tahribatsız Muayeneler.....	48
5.2.1 Girdap akımları testi.....	48
5.2.2 Işık mikroskobu ile metalografik muayene.....	49

5.2.3 Taramalı elektron mikroskobu ile metalografik inceleme	51
5.2.3.1 Çalışma prensibi	51
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	53
6.1 Malzeme Seçimi	53
6.2 Bant Genişliği Seçimi	53
6.3 Deneysel Çalışmalardaki Kaynak Kritik Faktörleri	55
6.3.1 Kaynak hızı ve güç ilişkisi	56
6.4 Kritik Faktörleri Göre Yapılan Deney Tasarımı	58
6.5 Deneysel Çalışmalardaki Test ve Muayeneler	59
6.5.1 Çekme testi	59
6.5.2 Mikro sertlik testi	62
6.5.3 Metalografik muayene	63
6.5.4 Yassılma testi	63
6.5.5 Genişletme testi	64
6.5.6 Kripling testi	65
7. DENEY SONUÇLARI VE YORUMLAR	67
7.1 Malzeme Seçimi	67
7.1.1 H320 malzemesi incelemesi	70
7.2 Çekme Testi Sonuçları	71
7.3 Sertlik Testi Sonuçları	74
7.4 Yassılma Testi Sonuçları	76
7.5 Konik Genişletme Testi Sonuçları	80
7.6 Kripling Testi Sonuçları	81
7.7 Metalografik Muayene Sonuçları	82
7.8 Deney Tasarımı Sonuçları	84
7.9 Genel Sonuçlar ve Yorumlar	89
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	91
KAYNAKLAR	93
EKLER	95
ÖZGEÇMİŞ	113

KISALTMALAR

ÇF	: Çift Fazlı
EDÇ	: Erdemir Çelik
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
YDDA	: Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Seçilen karbür ve nitrürler için A ve B sabitleri [15].	23
Çizelge 4.1 : Termal, Geçiş ve Elektrik Güç modunda güç, ITAB bölgesi genişliği formülleri.	31
Çizelge 5.1 : Yüksek frekans kaynağı metalografik muayene uygun geometrisi.	50
Çizelge 5.2 : Işık mikroskobu – Elektron mikroskobu karşılaştırma.	51
Çizelge 6.1 : İncelenen ürünün yapıldığı malzemelerin kimyasal değerleri.	53
Çizelge 6.2 : Deney tasarım alt ve üst noktaları.	56
Çizelge 6.3 : Farklı hız değerlerinde diğer parametrelerin değişimi.	57
Çizelge 6.4 : Farklı hız değerlerinde yapılan deneylerin tahribatlı test sonuçları.	57
Çizelge 6.5 : Deney tasarım tablosu.	59
Çizelge 7.1 : Deneyde kullanılan malzemenin kimyasal değerleri.	69
Çizelge 7.2 : Deneyde kullanılan malzemenin mekanik değerleri.	70
Çizelge 7.3 : Deneyde kullanılan malzemenin Pcm değeri hesabı için kimyasal değerleri.	70
Çizelge 7.4 : Deneyde kullanılan malzemenin mekanik değerleri.	71
Çizelge 7.5 : Kaynak pozisyonu çekme yönüne dik çekme test sonucu mekanik değerleri.	72
Çizelge 7.6 : Kaynak pozisyonu çekme yönünde çekme test sonucu mekanik değerleri.	74
Çizelge 7.7 : Yassılma testi sonuçları.	77
Çizelge 7.8 : Konik genişletme testi sonuçları.	80
Çizelge 7.9 : Termal Mod şartı ve ITAB genişlik formülü.	83
Çizelge 7.10 : Numunelerin fiili ITAB genişlikleri ve teorik değerler.	84
Çizelge 7.11 : Numunelerin ortalama çekme dayanımları.	85

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Boru kaynak sürecinde akımın izlediği yol [3].	3
Şekil 2.2 : Yüksek frekans indüksiyon kaynağını gerçekleştiren temel 2 etken [4].	4
Şekil 2.3 : Farklı frekans değerlerinde akımın nüfuziyet derinliği [5].	4
Şekil 2.4 : Yakınlaşma etkisi ile akım geçen iki telin birbirlerine bakan yüzeylerinde akımın toplanması [4].	5
Şekil 3.1 : Düşük karbonlu çelikler, YDDA ve ÇF çelikler için gerilme-uzama eğrileri [12].	15
Şekil 3.2 : Sıcak ve soğuk EDC mikro alaşımlı çeliklerin kimyasal değerleri.	16
Şekil 3.3 : Sıcak ve soğuk EDC mikro alaşımlı çeliklerin mekanik değerleri.	17
Şekil 3.4 : 1940'dan 2000 yılına YDDA çeliklerin gelişimi [15].	19
Şekil 3.5 : Pota Fırını [15].	20
Şekil 3.6 : Vakumla gaz alma süreci [15].	21
Şekil 3.7 : Sürekli döküm için teknolojik ekipmanlar [15].	22
Şekil 3.8 : Ti ve Nb mikro eklentili çeliklerin nitrürlerin ve karbürlerin çökeltme dereceleri [15].	23
Şekil 4.1 : Isı iletim modelinde kullanılan kaynak V geometrisi [2].	25
Şekil 4.2 : “Kritik Makine Hızı” - Boru çapının fonksiyonu olarak farklı frekanslarda gösterimi [2].	30
Şekil 4.3 : “Kritik Kaynak Frekansı” makine hızının fonksiyonu olarak gösterimi [2].	31
Şekil 4.4 : Empeder manyetik akısı – Kaynak frekansı [2].	33
Şekil 4.5 : Zamanın fonksiyonu olarak elektrik direnci [2].	34
Şekil 4.6 : Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlılığı [2].	35
Şekil 4.7 : H400LA kalite 1.5 mm et kalınlığındaki bandın metalografik muayenesinde görülen segregasyon bandı.	36
Şekil 4.8 : H320LA bandında kalite 1.5 mm et kalınlığındaki bandın metalografik muayene görüntüsü	37
Şekil 4.9 : Siyah kalıntı hatası [19].	38
Şekil 4.10 : Beyaz kalıntı hatası [19].	39
Şekil 4.11 : Açık kaynak hatası [19].	40
Şekil 4.12 : Köşelerde eksik ergime [19].	40
Şekil 4.13 : Soğuk merkez hatası [19].	41
Şekil 4.14 : Soğuk kaynak [19].	42
Şekil 4.15 : Döküm kaynak hatası [19].	42
Şekil 4.16 : Porozite hatası [19].	43
Şekil 4.17 : Kademeli kaynak zayıflığı hatası [19].	43
Şekil 5.1 : Enine kaynak slanı doğrulama metodu [20].	46
Şekil 5.2 : Yassılma testi [20].	46
Şekil 5.3 : Genişletme testi [20].	47
Şekil 5.4 : Katlama testi [20].	48
Şekil 5.5 : Girdap akımlarının çalışma prensibi.	49
Şekil 5.6 : Girdap akımlarının hatayı göstermesi.	49

Şekil 5.7 : Taramalı elektron mikroskobunun çalışma prensibi.	52
Şekil 5.8 : Taramalı elektron mikroskobunda incelenecek numunenin maksimum boyutları.	52
Şekil 6.1 : Bant genişliği 77 mm olarak imal edilen 25x2.5 imalatı.....	54
Şekil 6.2 : Bant genişliği 78 mm olarak imal edilen 25x2.5 imalatı.....	54
Şekil 6.3 : Deneyde kullanılan kılıçlı makara seti teknik resimleri.	55
Şekil 6.4 : Deneyde kullanılan kılıçlı makara seti kılıçları.	55
Şekil 6.5 : Kaynakaltı 3'lü makara seti teknik resmi.	56
Şekil 6.6 : Denemenin yapıldığı makinedeki 25x1.5 imalatı için Hız-Güç eğrisi.	57
Şekil 6.7 : Numune hazırlama sürecinden bir görüntü.	59
Şekil 6.8 : Çekme testinde kullanılan çekme test cihazı.	60
Şekil 6.9 : ASTM E8 'e göre Kaynak pozisyonu çekme yönüne dik olacak şekilde alınan numune ölçüleri.	60
Şekil 6.10 : ASTM E8 'e göre kaynak pozisyonu çekme yönüne dik olacak şekilde alınan numuneler.	61
Şekil 6.11 : ASTM E8 'e göre kaynak pozisyonu çekme yönünde olacak şekilde alınan numune ölçüleri.	61
Şekil 6.12 : ASTM E8 'e göre kaynak pozisyonu çekme yönünde olacak şekilde alınan numuneler.	62
Şekil 6.13 : Deneydeki numunelerin kaynak bölgesinin sertlik ölçümünde kullanılan mikro sertlik cihazı.	62
Şekil 6.14 : Yassıltma testi	64
Şekil 6.15 : Genişletme testi.	65
Şekil 6.16 : Kripling testi.	65
Şekil 7.1 : Segregasyonun boru kaynağında Isı Tesiri Altındaki Bölgede görüntüsü.	67
Şekil 7.2 : Segregasyonun boru kaynağında Isı Tesiri Altındaki Bölgede boru yüzeyine çıkması durumu.....	67
Şekil 7.3 : (a), (b) Araç koltuğu karkas üreticisinin kripling işlemi sonucunda kaynak bölgesinde hasarın meydana geldiği borunun ITAB bölgesindeki segregasyon.	68
Şekil 7.4 : ITAB bölgeleri (a) 7132 kodlu EDÇ bandından yapılan borunun, (b) H320LA Borçelik bandından yapılan borunun metalografik muayeneleri.	68
Şekil 7.5 : Segregasyon çizgisinin eksene doğru alınmış durumu.....	69
Şekil 7.6 : Borunun kaynak olmamış bölümünden alınan parçadan yapılan çekme testi.	71
Şekil 7.7 : Kaynak pozisyonu çekme yönüne dik çekme testi yapılmış numuneler.	72
Şekil 7.8 : Kaynak pozisyonu çekme yönünde çekme testi yapılmış numuneler.	73
Şekil 7.9 : 2 numaralı numunenin kaynak bölgesi sertliği ve mikro yapısı.	75
Şekil 7.10 : 4 numaralı numunenin kaynak bölgesi sertliği ve mikro yapısı.	75
Şekil 7.11 : 3 numaralı numunenin metalografik muayene resmi.	78
Şekil 7.12 : 3 numaralı numunede saat 12 yönünde göçme.....	78
Şekil 7.13 : 4 numaralı numunede saat 3 yönünde göçme.....	79
Şekil 7.14 : 4 (solda), 5 (sağda) numaralı numunelerin metalografik muayenesi.	79
Şekil 7.15 : 16 numaralı numunenin metalografik muayenesi.	79
Şekil 7.16 : 5 (solda), 6 (sağda) numaralı numunelerin metalografik muayenesi.	81
Şekil 7.17 : 13 adet numuneye uygulanan kripling işlemi sonrası numuneler.	82
Şekil 7.18 : 4 numaralı numuneye uygulanan kripling işlemi sonrası durum.	82
Şekil 7.19 : Faktörlerin dayanıma etki yüzdesi yarım normal grafiği.	85

Şekil 7.20 : Faktörlerin dayanıma etki yüzdesi tam normal grafiği.	86
Şekil 7.21 : Faktörlerin dayanıma etki pareto diyagramı.	86
Şekil 7.22 : Dayanım için faktörlerin etki grafiği.	87
Şekil 7.23 : Dayanım için faktörlerin birbiri ile olan ilişki diyagramı.	88
Şekil A.1 : 25x1.5 indesta şikayet edilen 7132 EDÇ bandı ile üretilen koltuk borusu.	96
Şekil A.2 : SEM’de çatlak görüntüsü.	96
Şekil A.3 : Çatlağın devamında görülen kesik kesik izler.	97
Şekil A.4 : Çatlağın doğrultusundaki inklizyon çizgisi görüntüsü.	97
Şekil A.5 : Sol görüntü farklı malzemeleri daha koyu göstermekte.	98
Şekil A.6 : Çatlağın devamında görünen hata.	98
Şekil A.7 : Çatlağın devamındaki inklizyonun kimyasal analizi Mn ve S oranının yüksek çıkması Mangan ve Kükürt içeriğinin MnS olarak 7132 EDÇ bandında biriktiği bölgeden kaynaklandığını göstermektedir.	99
Şekil A.8 : Kare içindeki bölgenin EDX analizi.	99
Şekil A.9 : Kare içindeki bölgenin MnS içeriği.	100
Şekil B.1 : H320 malzemeli borunun kaynak bölgesi metalografik incelemesi.	101
Şekil B.2 : 1.Bölge (solda) ve 2. Bölge (sağda) küçük taneli yapılar.	101
Şekil B.3 : H320 malzemeli boruda çatlayan numunenin kaynak bölgesi incelemesi.	101
Şekil B.4 : 4 mikron çapında Ti, Nb taneleri bulunan bölge.	102
Şekil B.5 : EDX analizi sonrası bulunan Ti, Nb taneleri.	102
Şekil B.6 : 5 mikron çapında Ti, Nb taneleri bulunan bölge.	103
Şekil B.7 : EDX analizi sonrası bulunan Ti, Nb taneleri.	103
Şekil B.8 : 8 mikron çapında Ti, Nb taneleri bulunan bölge.	104
Şekil B.9 : EDX analizi sonrası bulunan Ti, Nb taneleri.	104
Şekil B.10 : 8 mikron çapında Ti, Nb, Mn, Al taneleri bulunan bölge.	105
Şekil B.11 : EDX analizi sonrası bulunan Ti, Nb, Mn, Al taneleri.	105
Şekil B.12 : Kaynak bölgesi dışında malzemedeki yaklaşık 1 mikron çapında Ti taneleri bulunan bölge.	106
Şekil B.13 : Kaynak bölgesi dışında malzemedeki yaklaşık 1 mikron çapında Ti taneleri bulunan bölge.	106
Şekil B.14 : Kaynak bölgesi dışında malzemedeki yaklaşık 2 mikron çapında Ti taneleri bulunan bölge.	107
Şekil C.1 : Numunelerin metalografik görüntüleri: (a) 2 numaralı. (b) 3 numaralı. (c) 4 numaralı. (d) 5 numaralı. (e) 6 numaralı. (f) 7 numaralı.	108
Şekil C.2 : Numunelerin metalografik görüntüleri: (a) 10 numaralı. (b) 11 numaralı. (c) 12 numaralı. (d) 14 numaralı. (e) 16 numaralı. (f) 17 numaralı.	109
Şekil C.3 : Numunelerin metalografik görüntüleri: (a) 18 numaralı. (b) 19 numaralı.	110
Şekil D.1 : Kaynak pozisyonu çekme yönüne dik numunelerin çekme grafikleri. .	111
Şekil D.2 : Kaynak pozisyonu çekme yönünde numunelerin çekme grafikleri.	111

YÜKSEK FREKANSLI İNDÜKSİYON KAYNAĞI YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN BOYUNA DİKİŞLİ ÇELİK BORULARDA KULLANILAN MİKRO ALAŞIMLI MALZEMELERİN KAYNAK ZAYIFLIĞININ AZALTILMASI

ÖZET

Yüksek frekanslı indüksiyon kaynağı yöntemiyle boyuna dikişli boru üretim hatlarında üretilen boru ve profiller günümüzde otomotiv, beyaz eşya, mobilya gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli çelik kalitelerinde uygulanabilen bu yöntem düşük karbon ($C < 0.25$) içerikli malzemelerde kaynaklanabilirliğin iyi, aynı zamanda elektriksel olarak da verimli olması sebebiyle tercih edilmektedir. Kaynaklanabilirliği yüksek olan düşük karbon içerikli çelik tiplerinden yüksek dayanımlı düşük alaşımlı malzemelerin özellikle hafifliğin ve dayanımın ön planda olduğu otomotiv sektöründe kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.

Mikro alaşımlı malzemeler olarak da ifade edilen yüksek dayanımlı düşük alaşımlı malzemeler çeliğin kaynaklanabilirlikten taviz vermeden Ti, Nb, V elementlerinin toplamda en fazla % 0.22 oranında çelik içeriğinde bulunmasıyla dayanım artışı sağlanabilmektedir. Mikro alaşımlı malzemeler sürekli döküm yöntemi tercih edilmekte, bunu takip eden özel karışım işlemleri ve mekanik işlemler ile üretilmektedir. Isıl çevrimlerin veya mekanik (termomekanik) işlemlerin hatalı uygulanması ile çelik dökümünde segregasyon hataları görülebilmektedir. Bu tip hatalara sürekli döküm yöntemiyle üretilen rulo saclarda genelde soğumanın yavaş olduğu genişliğin orta bölümünde daha sık rastlanır. Genişliğinin orta bölümünde segregasyon bulunan boru hammaddesi rulo sac, üretilcek boru çapına uygun genişliklerde dilinir. Bu alınan dilimlerde rulonun orta bölümüne düşen parça kenarlarının kusurlu bölgeye denk gelme ihtimali vardır. Bu kusurlu kenara sahip dilimlerden yapılan borularda kaynak işlemi sonrası kaynak bölgesi incelendiğinde segregasyon çizgisi sacın genelde kesit olarak orta bölümünde ortaya çıkmakta ve kaynak zayıflığına yol açabilmektedir.

Bu çalışmada çelik boru üretimi hakkında genel bilgi ve teorilere yer verilmiştir. Teorik bilgiler ışığında günümüzde gittikçe yaygınlaşan mikro alaşımlı malzemelerin yüksek deformasyon içeren işlemlere dayanabilecek kaynak kalitesi elde etmek için mikroskobik, makroskobik analizler ve mekanik deneyler yapılmıştır. Deneyler öncesi, kullanılacak malzeme için farklı malzeme denemeleri yapılmış ve kesilen boru çelik sac genişliğindeki değişimin etkileri incelenmiştir. Kaynak bölgesindeki segregasyon içeriğini ne tür malzemeler oluşturabileceğinden bahsedilmiş ve incelenen üretim için segregasyona sebep olan yapının içeriğinin ne olduğu saptanmıştır. Segregasyon ile baş edebilmek için yapılabilecekler ortaya konulmuştur. Deneyler için kritik 4 faktör; (a) boru makinesi hızı, (b) gücü, (c) kaynak altı makarası, (d) üst ve alt kılıçlı makaraları arası mesafe belirlenmiş ve bu faktörlere göre deney tasarımı çalışması yapılmıştır. Literatürdeki matematiksel ve teorik bilgiler ışığında bahsedilen faktörlerin birbirleri ile etkileşimi de göz önünde

bulundurularak uygun kaynak faktörleri tahribatlı testler, kaynak dikişindeki metalografik muayene ve kaynak geometrik kontrolleri ile saptanmıştır. Ayrıca kaynak akımı, voltajı, frekansı, makine hızı ve kaynak bölgesindeki sıcaklık değerleri de incelenerek kaynak dayanımı, deney tasarımı çalışması ile ortaya konulmuştur.

WELD WEAKNESS REDUCTION OF LONGITUDINAL WELDED STEEL PIPE CONSISTING OF MICRO ALLOYED MATERIALS PRODUCED BY HIGH-FREQUENCY INDUCTION WELDING METHOD

SUMMARY

Longitudinal welded pipe production lines with high-frequency induction method, currently produced pipes and profiles of automotive, white goods, are widely used in different sectors such as furniture. This method can be applied to good welding quality for a variety of low carbon steel grades that carbon ratio is less than 0.25 % (The lower carbon ratios increase weldability), also this method has high electrical efficiency. These low carbon content and micro-alloyed steel types of materials are use in the automotive sector. Day by day, demand of lower weight and higher strength is climb over the last few years.

High frequency welding method developed from low and medium frequency techniques, which were developed around the turn of the century. Firstly, the rotating contact wheel is used to heat the edges. It is not capable to do good weld with high speed and high heat level. In the 1950s, high frequency contact welding was invented. High frequency Induction welding was developed at the same time. In the High frequency induction tube-welding process, current at 400 kHz is induced in the open seam tube. The coil does not contact the tube. The High frequency welding process linked with two phenomena-Skin Effect and Proximity Effect. Skin effect is the tendency of HF current to concentrate at the surface of a conductor. Proximity effect is the tendency of the high frequency current to concentrate conductor surfaces which are nearest each other.

High frequency induction welding method has three significant equipment. These are induction coil, impeder, weld rolls. The induction coil is copper based material that is conduct high frequency current as primary of transformer and seam tube as a one turn secondary of transformer. Another one is impeder. The role of impeder is increasing welding efficiency. The material of impeder is ferromagnetic zinc, manganese, nickel. The impeder is produced as sintering process. The good impeder has high saturation flux density, high curie temperature. Weld rolls function is to apply sufficient pressure to make good weld. There are different types of weld rolls arrangements. Four roll boxes are always recommended for large outer diameters and thick walls. If produced tube has smaller outer diameters and thin wall thickness, the three or two rolls box can be chosen.

High carbon steels are widely used in the production pipe. This material is acting as two different types of steels in different temperature ranges. It is also the most fascinating because, over the temperature range encountered in forge welding, it behaves as two distinctly different materials. Below about 500 degrees C, the material exhibits appreciable magnetic permeability (even at high frequency welding frequencies), a relatively low electrical resistivity, and high tensile strength. At temperatures above 800 degrees C (1472 degrees F), the material has the magnetic

permeability of free space (air), a relatively high electrical resistance (over five times that at room temperature), and low tensile strength.

The micro alloyed steels have origin to the weldable unalloyed construction steels containing up to 0.2 % C and 1.8 % Mn. The Ti, Nb, and V micro additions are introduced into low carbon steels. The aim of that create the dispersive particles of the MX (M: Nb, Ti and V; X: N and C) interstitial phases. The effect of the dispersive particles of the MX phases on development of the fine-grained structure may be explained basing on steel structure changes during hot-working

Referred to as micro-alloyed materials of high strength low-alloy steel materials without compromising weldability Ti, Nb, V, elements of the total resistance to the presence of up to 0.22 % increase in steel content can be provided. Micro alloyed materials produced by continuous casting method, the subsequent processing and handling, are manufactured with a special blend. Heat cycles and mechanical (thermo mechanical) incorrect application of procedures can be seen in the steel casting segregation. This type of roll sheets produced by the method of continuous casting errors that slow cooling is usually more common in the middle part of the width. Segregation in the middle of the width of the raw material of the pipe coil is cut with slitting machine as matching widths with the diameter of the pipe to be produced. When these slices are taken from the middle sections of the coil, it can be possible to be confronted by a welding problem in this defective region. This defective weld area after welding process was examined in slices with a side line of segregation in the central area is emerging as a cross-section of the sheet and the weld often can lead to weakness.

The micro alloyed steel weldability level is heat-affected zone cracking parameter Pcm. It is more useful than carbon equivalent value.

A clear definition of the details of the experiment makes the desired statistical analyses possible, and almost always improves the usefulness of the results. The overall data collection and analysis plan considers how the experimental factors, both controlled and uncontrolled, fit together into a model that will meet the specific objectives of the experiment and satisfy the practical constraints of time and money.

The statistical method can be used for finding optimum welding parameters. Firstly, critical factors should be chosen for design of experiment. Then, upper and lower factor values are decided and the design matrix should be obtained by $2^{factor\ number}$ formula.

In this study and theories are given general information about the production of steel pipes. In light of today's increasingly widespread in the theoretical information, research and experiments were done for micro alloyed materials that can withstand high deformation processes and what can be done to obtain the quality weld. Firstly, Material to be used to the experiments for different materials and slitting pipe steel sheet width change are investigated. Segregation and the contents of the segregation are examined for the quality weld. Content of the steel structure is found to be caused segregation. Especially Mangan Sulphur is responsible segregated areas in weld zone. Another point is coarse grain of Ti and Nb based particles. These particles are non-homogeneous distribution in the steel and the sizes of them are 2-5 microns. The size of these particles can be assumed as coarse because the investigations say that desirable size of these particles smaller than 100 nanometer.

In experiments, four factors are chosen as critical factors: pipe machine speed, welder unit power, welding pass roller diameter, fin pass roller gap. The experimental design study is carried out according to these factors. Mathematical and theoretical knowledge is researched in the literature. In light of the literature researches, these mentioned factors and interaction between them is taken into account. The significant factors are found by the method of destructive tests, welding and metallographic inspection of weld seam with geometric controls. In addition of that welding current, voltage, frequency, machine speed and temperature factors are taken into account to specify the weld strength in the experimental design.

A secondary heat treatment is expected to welding zone ductility. The aim of high ductility is incrimination formability of the weld.

Strength of ductile materials, plastic material is defined as the resistance change of shape. Material within the plastic deformation both the density of dislocation defects called linear both their interactions with the described or other defects. This complicates the movement of dislocations in materials or materials that would prevent the kind of impact strength incrimination.

Future investigations can be done in new production process of these tubes; so the satisfaction of customers' could be increased day by day. Tubes are used for harder applications. These applications include expectation of formability and strength of steel.

1. GİRİŞ

Kaynak basit olarak iki veya daha çok metalin ısı ve basınç uygulanması ile bir araya getirilmesidir. Eskiden demirciler kaynağı birleştirecekleri iki malzemeyi akkor hale gelene dek tutmakta daha sonra iki akkor malzemeyi birbiri üzerinde döverek ve soğumasını bekleyerek gerçekleştirmektedir. Gelişen sanayi ile kaynak yapılacak bölgelerin karmaşıklığı ve çokluğu, hızlı, kolay uygulanabilir kaynak yöntemlerini gerektirdi. Bu ihtiyacı karşılayan ilk yöntem, elektrik direnç kaynağı 1885 yılında Profesör Elihu Thompson tarafından keşfedilmiştir. Bu yöntemde transformatörden üretilen elektrik akımı bir araya getirilen metaller üzerinden akmaktadır. Bu akımın ara yüzeyin direnci sayesinde oluşan ısınma ve o esnada akımın aktarılmasını sağlayan elektrot tarafından uygulanan basınç ile bağlantı sağlanmaktadır.

Elektrik direnç kaynağında kullanılan döner elektrot diski, bant kenarlarında akımın saniyede 60 kez yön değiştirmesi (60 Hz) ile kaynağın oluşmasını sağlamaktadır. 2. Dünya savaşı sırasında radar uygulamaları için geliştirilen yüksek frekans osilatörlerinin kaynak prosesinde de kullanılabileceği anlaşılmıştır. Yüksek frekans kaynağı ile yüksek hızlara ve verimliliğe ulaşmak mümkün olmuştur [1].

Yüksek Frekanslı indüksiyon kaynağı yönteminde, indüktör olarak kullanılan bakır sargı bulunur. Akım, bu sargının içinden geçen yarık borunun kaynak baskısının verildiği noktaya doğru saniyede 400,000 defa yön değiştirir (400 KHz). Geçen akım ile oluşan ısı kaynak noktasındaki malzemeyi eritir. Maksimum sıcaklığa ulaşmış kaynak noktasında basınç etkisiyle ek malzeme kullanılmadan temiz ve güçlü kaynak elde edilir.

Yüksek frekans indüksiyon kaynağı, çalışılan makine hızı ve frekansına göre termal veya elektriksel parametrelere duyarlı çalışabilmektedir. Termal olarak sistemin çalışması düşük elektrik sarfiyatı ve süreç içi değişkenlikten daha az etkilenmesi yönü ile avantajlıdır [2]. Bu çalışmada empedor, indüktör tipi, konumu ve geometrisi, kaynak V açısı, bant kenar birleşme durumu, kaynak baskısı ve bant kenar hataları gibi değişkenlikleri dışında mikro alaşımlı malzemelerde kaynak gücü, makine hızı

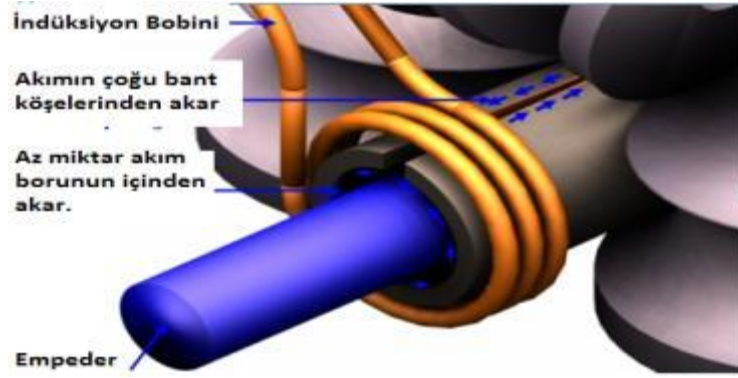
ve frekans değerlerinin etkisi üzerinde durulmuştur. Ayrıca kaynaklı boruda yapılan ikincil şekillendirme işlemlerinde kaynak bölgesinde meydana gelen çatlakların sebepleri incelenmiştir.

Deney için kalitesi, kimyasal ve mekanik değerleri bilinen mikro alaşımlı çelik sac hammaddesinden, farklı makine hızı ve kaynak gücüyle üretilen 25 mm dış çap, 1.5 mm et kalınlığında boru numuneleri alınmıştır. Bu numunelerde tahribatlı ve mekanik testler yapılmıştır. Ayrıca kaynak bölgelerinin makro resim geometrileri karşılaştırılarak en iyi çalışılabilecek makine hızı, kaynak gücü ve kaynak frekans değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı

Yüksek frekans indüksiyon kaynağı, Şekil 2.1’ deki gibi bakır indüksiyon bobinini birincil, kaynak edilecek açık boruyu ikincil olarak nitelendirilebilecek transformatör mantığıyla çalışan bir düzendir. İndüksiyon bobininin oluşturduğu manyetik alan ile oluşan indüklenmiş akım, borunun yarık olan kısmından ve iç yüzeyinden devreyi tamamlar. Borunun içinde bulunan indüksiyon bobini hizasındaki empede, borunun iç yüzeyinden devreyi tamamlayan akım miktarını azaltır. Akımın geçtiği köşeler Joule yasasına göre ısınır ve kaynak altı makaraları yardımıyla gerekli basınç oluşturularak istenilen kaynak elde edilir.



Şekil 2.1 : Boru kaynak sürecinde akımın izlediği yol [3].

Yüksek frekans kaynağını oluşturan iki önemli etken; Yüzey etkisi ve yakınlaşma etkisi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Yüksek frekans indüksiyon kaynağını gerçekleştiren temel 2 etken [4].

2.2 Yüzey Etkisi

Yüzey etkisi, bir iletken üzerinden geçen akımın frekansı arttıkça Şekil 2.3'te görüldüğü gibi akımın yüzeyden akma eğilimi artacağına ifadesidir. Yüksek frekans akımında nüfuziyet derinliği (2.1) denklemi ile bulunur. 5.03 çelik için sabit bir değerdir.

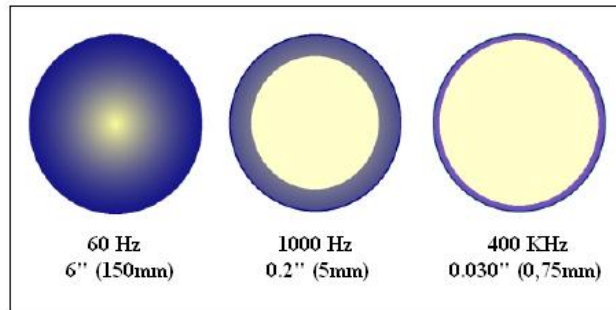
$$\delta = 5.03 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (2.1)$$

δ : Nüfuziyet derinliği [cm]

ρ : Elektrik direnci [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]

μ : Manyetik geçirgenlik [$\frac{\text{H}}{\text{m}}$]

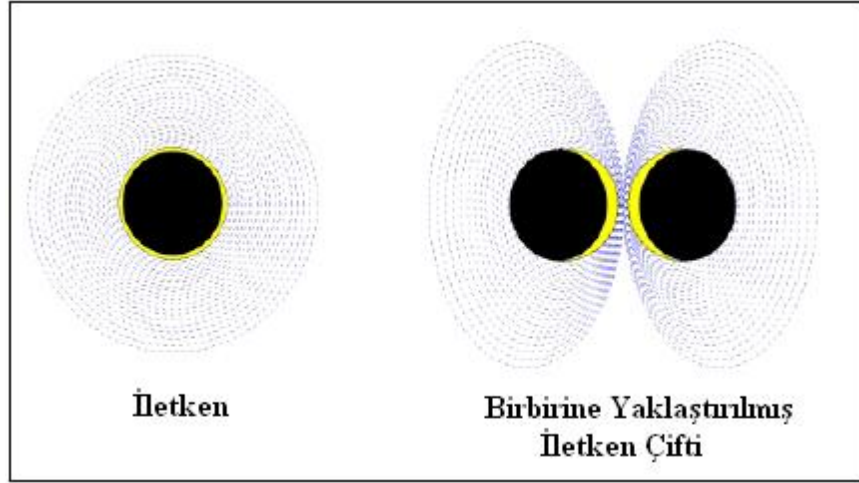
f : Frekans [Hz]



Şekil 2.3 : Farklı frekans değerlerinde akımın nüfuziyet derinliği [5].

2.3 Yakınlaşma Etkisi

İletken bir tel üzerinden akım geçtiğinde tel etrafında manyetik alan çizgileri oluşur. Üstünden akım geçen iki iletken birbirine yaklaştırıldığında manyetik alan çizgileri ve akım Şekil 2.4'te olduğu gibi tellerin birbirlerine bakan yüzlerinde yoğunlaşır. Buna yakınlaşma etkisi denir.



Şekil 2.4 : Yakınlaşma etkisi ile akım geçen iki telin birbirlerine bakan yüzeylerinde akımın toplanması [4].

3. METALLERDE DAYANIM ARTTIRICI MEKANİZMALAR

Sünek malzemelerde dayanım, malzemenin plastik şekil değişimine gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Plastik şekil değişimi, malzemelerin bünyesindeki dislokasyon adı verilen çizgisel kusurların gerek yoğunluğu, gerek kendileri ya da diğer kusurlarla ilgili etkileşimleri ile açıklanmaktadır. Malzemelerin içindeki bu dislokasyonların hareketini zorlaştıracak ya da engelleyecek her türlü etki malzemede dayanım artışına yol açmaktadır.

Metallerde dayanım artışını sağlayan kristal yapıdaki dislokasyon hareketlerinin zorlaşması, uygulamada başlıca şu mekanizmaların çalıştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir.

- 1- Alaşım Sertleşmesi.
- 2- Çökelme Sertleşmesi.
- 3- Dispersiyon Sertleşmesi.
- 4- Deformasyon Sertleşmesi.
- 5- Tane Sınırları Sertleşmesi.
- 6- Martenzitik Dönüşüm Sertleşmesi.
- 7- Radyasyon Etkisiyle Sertleşme [6].

3.1 Alaşımlama ile Dayanımın Arttırılması

Karbonlu çeliklerden normal olarak sağlanamayan kendine has özellikleri sağlayabilmek amacıyla, bir veya birden fazla alaşım elementi ilave etmek suretiyle üretilen çelikler alaşımlı çeliklerdir.

Alaşım elementlerinin etkileri toplanabilir olmadığından, çok sayıda alaşım elementinin birlikte bulunması halinde beklenen özellik değişimleri ancak genel çerçevede ele alınabilir ve bu konuda kesin bir yaklaşım yapılamaz.

Alaşımlı çelikler, alaşım elemanlarına (karbon ve arıtilamayan elemanlar dışında kalan diğerleri) göre düşük alaşımlı çelikler ve yüksek alaşımlı çelikler olmak üzere, iki ana gruba ayrılırlar. Bir çeliğin yüksek alaşımlı çelik olabilmesi için Smith ve Hashemi'ye göre % 4 oranından fazla alaşım elementi içermesi gerekirken Degarmo'ya göre bu oran % 8'dir [7] [8].

Alaşımsız çeliklere benzer davranışa sahip olan düşük alaşımlı çeliklerin en belirgin özelliği, sertleşme kabiliyetlerinin yüksek olmasıdır. Ayrıca sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı, elastiklik modülü gibi dayanım özellikleri ile ısıya dayanıklılık, meneviş dayanıklılığı gibi karakteristikler yükselirken genellikle kopma uzaması, kesit daralması, çentik darbe dayanımı gibi değerlerde azalma olur.

Alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde, istenilen özelliklerin bulunmaması veya yetersiz olması halinde yüksek alaşımlı çelikler kullanılır. Bu tür alaşımlama, normal sıcaklıklardaki mekanik dayanımın artırılmasının yanısıra özellikle ısıya, tufallaşmaya, korozyon dayanımına, sıcaklıkta sertlik ve manyetiklenmeme gibi bazı istenen özelliklerin elde edilmesini amaçlar.

Karbonlu çeliklerden normal olarak sağlanamayan kendine has özellikleri kazanmak için bir veya birden fazla alaşım elementi katmak suretiyle yapılan çelikler alaşımlı çeliklerdir. Mn, Si gibi alaşım elementlerinin bir veya birden fazlasının, çeliğin içindeki değerleri Mn % 1.65 Si % 0.60'dan fazla olan ve bunlara eklenen diğer elementlerden Al, B, Cr, Co, Mo, N, Ti, W, V, Zr birinin veya birkaçının bulunması istenen çelikler, alaşımlı çelikler sınıfına girer.

Alaşımlı çeliğin, alaşım elementlerinin alt ve üst limit değerleri arasındaki fark çok az olup, alaşım elementi sayısı arttıkça, alınacak dökümler de uygun olmayanların sayısı fazlasıyla artar. Alaşımlı çelik ingot ve kütüklerinin gerek yüzünde gerekse içinde meydana gelmesi muhtemel çatlamalara neden olmaması için döküm sonrası yavaş soğutulur. Bu sebepler dikkate alındığında alaşımlı çelik yapımı, karbonlu çeliklere kıyasla daha zordur [9].

3.1.1 Alaşım elementlerinin çeliğe etkisi

Karbon: Çelikte başlıca sertleştirici etkisi olan elementtir. Karbon miktarındaki her artış, çeliğin sıcak haddeleme veya normalize edilmiş halindeki sertlik ve çekme dayanımını artırır. Fakat esnekliğini, dövülme, kaynak edilme ve kesilme özelliğini zayıflatır.

Karbon miktarının artmasıyla sertlik ve dayanım, % 0.8 karbona kadar çekme gerilmesi ve akma sınırı değerleri artar. Bu değerden sonra kırılmalık artar, ısıtıl işlem sonu sertlik kalıntı östenit sebebiyle daha fazla artamaz. Çeliğin alabileceği max sertlik 67 HRC olup bu değer % 0.6 karbon miktarı ile elde edilir. Karbon miktarının artması aynı zamanda sünekliği, dövülebilirliği, derin çekilebilirliği ve kaynak kabiliyetini düşürür. Yüksek karbonlu çeliklerin ısıtıl işleminde çatlama riski de fazladır.

Mangan: Katı çözelti sertleşmesini sağlamasına ek olarak Mangan ostenitten ferrite geçiş sıcaklığını düşürür. Tane küçültme etkisiyle dayanımın artırılmasını sağlamaktadır. Diğer yandan Segregasyon ve mikro bantlaşmayı azaltmak için limit altında tutulmalıdır. Çeliğin dayanımını geliştirir. Esnekliğini az miktarda azaltır. Dövme ve kaynak edilme özelliğine olumlu etkide bulunur. Manganın, sertlik ve dayanımı artıran özelliği, karbon miktarına bağlıdır. Manganın yüksek karbonlu çeliklerdeki etkisi, düşük karbonlu çeliklere oranla daha fazladır. Mangan su verme derinliğini artırır. Paslanmaya, korozyona olan dayanımını geliştirir.

Mekanik özellikleri iyileştirmesi dolayısıyla ayrıca ilave edilebilir, temel alaşım elementi olarak da kendisini gösterebilir. Genel olarak sünekliği azaltmakla birlikte çeliğin dayanımını artırır özelliğe sahiptir. % 3 Mn miktarına kadar, her % 1 Mn için çekme dayanımı yaklaşık 100 MPa kadar artar. % 3-8 arası artış azalır. % 8 den itibaren düşüş görülür. Çeliğin dövülebilirliği ve sertleşebilirliğini iyileştirici özelliktedir. Kaynak kabiliyetini etkilemez ve kaynaklanabilir malzemeler içinde % 1.6 oranına kadar yükseltilebilir. Manganın iyi yöndeki etkisi karbon oranının artmasıyla birlikte artar.

Silisyum: Çelik dökümlerde fiziksel dayanımı artırır. Silisyum, mangan gibi bütün çeliklerde bulunan bir elementtir. Çelik yapımında demir cevherinden veya ocak astarı olan tuğlalardan da bir miktar silis, çeliğin bünyesine kendiliğinden girer. % 14 arasında silisyum bulunan çelikler, kimyasal tepkilere karşı dayanımlı olduklarından, bu durumdaki çelikler dövülemezler. Çelik üretimi esnasında deoksidan olarak kullanılır. Döküm çeliklerde, döküme akıcılık sağlamak için ilave edilebilir. Ferrit içerisinde çözüneme özelliğine sahip olduğu için malzemenin süneklik ve tokluğunu düşürmeden, dayanımı ve sertliği artırır. Yüksek silisyum içeren çeliklerin ısı dayanımı da yüksektir. Genel olarak sertleşebilirliği, aşınma dayanımını ve elastikiyeti yükseltmesine karşın yüzey kalitesini olumsuz yönde etkiler.

Krom: Katı çözültü sertleştiricisi ve karpit yapıcıdır. Çeliklerin sertleşebilirliğini artırır ve korozyondan koruma sağlar. Krom karpitler çökelediği yerlerde ferrit kenarlarına baskı yapar. Çeliğin dayanım özelliğini artıran fakat buna karşın esnekliğini çok az bir dereceye kadar eksi yönde etkileyen bir alaşım elementidir.

Krom, çeliğin ısıya dayanımını artırır. Kabuk, tufal yapmayı önler. İçinde yüksek oranda krom bulunması çeliğin paslanmaya karşı dayanımını artırır. Kromlu paslanmaz çeliklerde krom oranı arttıkça, kaynak edilebilme yeteneği azalır. Krom, dengesi çabuk bozulmayan karbürü meydana getirir. Çelikte % 1 oranındaki krom oranı artışına karşılık çekme dayanımında yaklaşık olarak 80-100 MPa'lık bir artış görülür. Aynı oran içinde olmamakla beraber, akma dayanımı yükselirse de çentik dayanımı düşer.

Nikel: Çeliğe mangana benzer faydası vardır. Ostenit sıcaklığını düşürme etkisi yanında tokluğu artırır ve katı çözültü dayanımı sağlar.

Nikel, çeliğin dayanımını silisyum ve mangana kıyasla daha az artırır. Çelikte nikel, özellikle kromla birlikte bulunduğu zaman sertliğin derinliklere inmesini sağlar. Krom nikelli çelikler paslanmaz, kabuklaşmaya ve ısıya dayanımlıdır. Özellikle düşük sıcaklıklarda, makine yapım çeliklerinin çentik dayanımını artırır. Nikel, ıslah ve sementasyon çeliklerinin dayanımını artırdığı gibi paslanmaya ve kabuklaşmaya dayanımlı çelikler için de uygun bir alaşım elementidir.

Nikel % 5'e varan oranlarda, alaşımlı çeliklerde geniş bir biçimde kullanılır. Nikel, malzemenin mukavemetini ve tokluğunu artırır. Özellikle paslanmaz çeliklerde daha fazla oranda yer alır. Nikel aynı zamanda tane küçültme etkisine de sahiptir. Alaşım elemanı olarak nikelin tek başına kullanımı son yıllarda azalmış Ni - Cr alaşımı başta olmak üzere Ni-Mo veya Ni-Cr-Mo alaşımları yaygınlaşmıştır. Sıcağa ve tufalleşmeye karşı iyileştirici özelliğe sahip olmasının yanı sıra krom ile birlikte kullanılarak sertleşmeyi, sünekliği ve yüksek yorulma direncini artırır.

Molibden: Isıya dayanımı sayesinde çeliğin çekme dayanımını artırır. Yüksek miktarda molibden çeliklerin dövülmesini güçleştirir. Molibden kromla birlikte daha çok kullanılır, etkisi volframa benzer.

Alaşımla çeliklerde molibden; krom nikelle birlikte kullanıldığında, akma ve çekme dayanımını artırır. Molibden kuvvetli karbür meydana getirdiğinden, hava ve sıcak iş

eliklerinde, ostenitik pasa dayanımlı çeliklerde, sementasyon, makine yapım çelikleriyle ısıya dayanımlı çeliklerin yapımında kullanılır.

Molibden düşük nikel ve düşük krom içeren çeliklerde temper gevrekliği eğilimini gidermek için kullanılır. % 0.3 civarında molibden ilavesi bunu sağlar. Molibden ilavesi yapılan nikel ve krom çeliklerinin temper sonrası darbe dayanımları da önemli ölçüde yükselir. Aynı zamanda akma ve çekme dayanımını artırır.

Vanadyum: Rekriztalizasyonu yavaşlatıcı ve ostenitin tane büyümesini normalleştirme ve haddeleme aşamasında yavaşlatıcı etkisi vardır. Kaynağın erimesi boyunca yüksek ısı girişinde VC, VN 1100 C büyük sıcaklıklarda ITAB da çözünür ve yavaş soğuma boyunca tekrar çökelir. VC, VN olarak tekrar çökelmesi ITAB'ın tokluğunu azaltır. Vanadyum, çok düşük miktarlarda kullanıldığında çeliğin sıcağa dayanımını artırır.

Vanadyum alaşımlı makine yapı çelikleri tane yapılarının ince olmasını ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesini sağlar. Aynı zamanda elik kesici uçlarının, daha uzun zaman keskin kalmasını sağlar. Genellikle, alaşımlı makine yapım çeliklerinde bulunan vanadyum miktarı % 0.3-0.5 arasında değişir. Karbür yapmaya karşı kuvvetli bir eğilimi vardır. Çeliğin ekme ve akma dayanımını arttırır. Makine yapım ve sıcak iş çeliklerinde özellikle vanadyum krom, hava ve makine yapım çeliklerinde volframla birlikte kullanılır.

Nikel gibi vanadyum da çelikler için önemli bir tane kltcdr. % 0.1 gibi bir oranda kullanılması bile sertleştirme prosesi esnasında tane irileşmesini önemli ölçüde engeller. Vanadyum sertlik derinliğini artırmakla beraber sıcaklık dayanımını da artırır. Özellikle kesmeye çalışan parçalarda, darbe dayanımının artmasını sağlayarak kesici kenarların formunun uzun süre muhafaza edilmesinde etkilidir.

Volfram: Çeliğin dayanımını artıran bir alaşım elementidir. Takım eliklerinde, kesici kenarlar sertliğinin artmasını, kullanma ömrünün uzamasını ve yüksek ısıya dayanımını sağlar. Bu yönden hava çeliklerinde, takım çeliklerinde ve ışlah çeliklerinde alaşım elementi olarak yaygın bir şekilde kullanılır. Çelikte volframın bulunması belirli yüzdelere kadar kaynak edilebilme özelliğine geliştirici etkiler yapar. eliğe ilave edilecek volfram yüzdesi, akma ve çekme dayanımını 40 Mpa'a kadar artırır. Volframın karbür meydana getirmeye karşı kuvvetli bir eğilimi olup,

yüksek çalışma sıcaklığında çeliğin menevişlenip sertliğini kaybetmemesini sağladığından, sıcağa dayanımlı çeliklerin yapımında tercih edilir.

Niobyum: Tane inceltici etkiye sahip olan element, aynı zamanda akma sınırını da yükseltir. Kuvvetli karbür yapıcı özelliği ile sertliği de artırır.

Titanyum: Kuvvetli karbür yapıcı özelliği vardır ve sertliği artırır. Çelik üretimi esnasında deoksidan olarak da kullanılır. Tane inceltici etkiye sahiptir.

Kobalt: Yüksek sıcaklıklarda tane büyümesini yavaşlattığı için daha çok hız çeliklerine ve sıcağa dayanıklı çeliklere ilave edilir.

Alüminyum: En güçlü deoksidandır. Isıtmada da tane kabalaşması ve yaşlanmayı azaltır. Tane inceltici özelliğe sahiptir.

Bor: Düşük ve orta karbonlu çeliklerin sertleşebilirliğini en etkin artırır özelliğe sahiptir. Sakinleştirilen çeliklere % 0.0005-0.003 kadar düşük oranda katılırlar.

Bakır: Sıcak şekillendirmede kırılganlığa sebep olduğu için % 0.5 oranı pek aşılmaz. Sünekliği ciddi oranda düşürmesine karşın korozyon dayanımını artırır ve sertliği artırdığı için ilave edilir.

Fosfor: Genel olarak çelikte zararlı olarak bilinir. Yüksek nitelikteki çeliklerde fosfor yüzdesi en çok olarak % 0.030-0.050 arasında tutulur. Çelik içinde fosfor bulunması ile malzeme tokluğunu düşüren, zararlı etkiye sahip bir elementtir. Çeliğin dayanımını ve sertliği artırıcı özelliği olmasına karşın süneklik ve darbe dayanımını düşürür. Bu etki yüksek karbonlu çeliklerde daha net görülür. Çelik içerisinde mümkün olduğunca düşük olmasına çalışılır ve kükürtle birlikte fosfor azlığı malzeme kalitesinde birinci kriteridir.

Kükürt: Çeliği kırılgan yapar ve haddelenmesini güçleştirir. Çeliğin işlenebilme özelliğinin artırılması söz konusu olmadığı hallerde, fosfor gibi istenmeyen yabancı maddeler olarak kabul edilen bir elementtir. Normal olarak müsaade edilen miktar en çok % 0.025-0.050 arasında sınırlandırılır. Demir ile birlikte Fe-S bileşiği oluşturarak tane sınırlarında birikir ve malzemenin gevrekleşmesine yol açar. 800 °C-1000 °C arasında şekil değiştirme esnasında "kızıl sıcaklık kırılganlığı" 1200 °C üzerindeki sıcaklıklarda "akkor sıcaklık kırılganlığı" meydana getirir. Bu sebeplerle çelik için zararlı bir element olarak kabul edilerek, giderilmesi yönünde çalışılır. Ancak otomat çeliklerinde iki katı kadar Mn ilave edilerek kullanılmak suretiyle, talaşlı

işlenebilirlik kabiliyetini artırmak amacıyla kullanılır. Genel olarak kaynak kabiliyeti ve sertleşebilirliği olumsuz etkiler.

Azot: Nitrür teşekkül ettirerek sertliği artırır. Nitrürasyon ile 1100 Vickers kadar sertlik elde edilebilir. Mekanik dayanım ve korozyona karşı direnci artırmasına karşın yaşlanma meydana getirir [9] [10].

3.1.2 Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler

Çekme dayanımı düşük karbonlu çeliklerde karbon oranı artışıyla artar; fakat kaynaklanabilirliği ve kırılma tokluğunu önemli miktarda azalır. Yüksek dayanımı kaynaklanabilir çelikler karbon oranı minimum tutularak dayanımı sağlamak için diğer mekanizmalar kullanılır. Bu mekanizmalar: Ferrit tane boyutunu küçültmek, bir miktar Mangan ve Molibden gibi alaşım elementleri eklenir. Bu elementlerin çözeltisi ve çok az miktarda, % 0.1'den az olacak şekilde Ti, Nb ve V gibi ferrit dayanımını çökelme sertleşmesi ile arttıran elementlerin eklenmesiyle ferriti sertleştirir.

Genel problem kırılma tokluğu geleneksel çeliklerde lineer olarak akma dayanımı arttıkça düşer. Bu ilişki farklı çeliklerde farklıdır. Prensip olarak çekme ve akma dayanımını etkileyen faktör karbon miktarıdır. Genelde çekme dayanımını perlit miktarındaki artış etkiler. Perlit miktarındaki artış aynı zamanda kırılma tokluğunda bozulmaya neden olur. Direkt olarak perlitin akma dayanımına etkisi düşüktür. Endirekt olarak ise perlit miktarındaki artış ferrit tanelerinin büyümesini engelleyerek ferritik tane boyutunu düşürme eğilimindedir. Ferritik tane yapısının küçülmesi akma dayanımını artırır. Akma dayanımı ferritin tane çapının karekökünün tersiyle lineer olarak değişir. Ferrit tane küçülmesi ayrıca akma ve kırılma tokluğuna da olumlu etki eder.

%1.5 Mn ve % 0.5 Mo miktarı üstünde bulunması. Ötektoid kompozisyon ve sıcaklığı etkiler. Mangan miktarı % 1.5 için Ötektoid kompozisyonundaki karbon miktarını lineer olarak % 0.77'den % 0.67'ye azaltır. Mn içeren çelikler aynı oranda karbon içerikli çeliklere göre daha çok perlit içerir. Aynı zamanda Ötektoid sıcaklık 723 °C'den 707 °C dereceye iner. Molibden eklentisinin ötektoid kompozisyona daha çok etkisi vardır. % 0.5 Mo, karbonu % 0.55'e düşürür. Diğer yandan Molibden, ötektoid sıcaklığı bir miktar yükseltir. Dahası bu elementler östenit içindeki çözünen olarak bulunduğunda östenitin dönüşüm karakteristiğini değiştirir.

Beynitin oluşması ya da perlitte birlikte oluşmasını sağlar. Beynitin tokluğa olumsuz etkisi vardır.

C-Mn çelikleri, ilk aşama olarak dayanımın ve kırılma tokluğunun beraber artışıdaki gelişimde yarı sakınleştirilmiş, gelişmiş tanecikli veya Si ile sakınleştirilmiş ingot ile C-Mn çelikleri üretilmiştir. C içeriği % 0.1'e kadar düşürülerek kaynaklanabilir ve tok malzeme elde edilebilir. Bu durum, perlit varlığındaki hacimsel oranı azaltır ve buna bağlı çekme dayanımını azalır; ancak akma dayanımında önemli bir etki bırakmaz. Akma dayanımı çözelti dayanımını sağlayan Mn miktarı arttırılarak ve aslen ferrit tane boyutunu küçülterek arttırılmaktadır. Ferrit tane boyutunu kontrol etmek en önemli meseledir. Haddemeleme işlemi, malzeme ostenitik haldeyken yapılmaktadır.

Nb-V içeren çelikler, C-Mn çelikleri içinde % 0.1 oranında Nb veya V ya da ikisi birden bulunması dayanım yanında tokluk veya kaynaklanabilirliği azaltmada fayda verdiği görülmüştür. Nb ve V etkisi benzerdir. Nb eklenmesi A3 sıcaklığının yukarısına kadar ostenitin rekristalizasyon sıcaklığını arttırır.

Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerin dayanım artışı; çözelti sertleşmesi, çökelme sertleşmesi ve tane boyutu küçülmesi ile gerçekleşir.

Çözelti sertleşmesi yer alan elementlerin eklenmesi ile oluşur. Değişmez eklenti elementi % 2 oranına kadar Mn'dır. Ayrıca Mo, Cu, Ni ve Cr de eklenebilir. Mo en etkilisidir. Çözelti sertleşmesi toplam dayanıma % 10 kadar etkisi vardır.

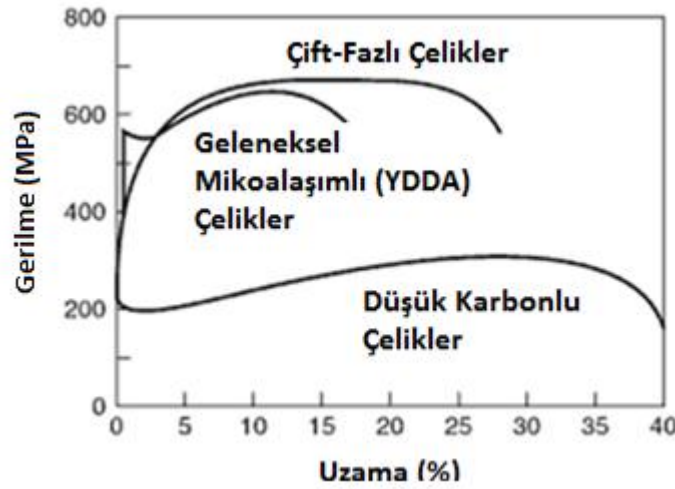
Çökelme sertleşmesi, mikro alaşım elementlerinin Nb, V, Ti, Al % 0.1'den az olacak şekilde eklenmesi ile oluşur. Bu etki toplam dayanımın % 25'inden sorumludur.

Tane boyutu küçültmesi, mikro alaşımlar eklenmesi ve kontrollü haddemeleme işlemleri ile yapılır. Mikro alaşım elementleri ostenitin rekristalizasyon sıcaklığını arttırır. Ferritin tane yapısının küçülterek % 70-75 oranıyla en büyük dayanım arttırma faktörüne sahiptir.

Dönüşüm sertleşmesinde ise ferritin iğnemsî yapıda oluşması sayesinde dayanım artışı sağlanır. Bunun küçük ama anlamlı olarak dayanıma etkisi vardır [11]. Tane küçültücü karbür ve nitrürlerde ostenit içinde bu parçacıkların çözünürlüğü sırayla VC, TiC, NbC olacak şekilde azalır. Nitrür genellikle daha düşük çözünürlükte olacak şekilde çözünürlüğü sırasıyla VN, AlN, TiN ve NbN olacak şekilde azalır. NbC ve NbN düşük çözünürlüklerinden dolayı en etkin tane küçültücülerdir. Al, V,

Ti yüksek nitrojen çeliklerinde etkindir. Al sadece Nitrit oluşturur. VC, VN ve TiC, TiN ostenit içinde nitritleri karbürlere göre daha düşük çözünürlüktedir.

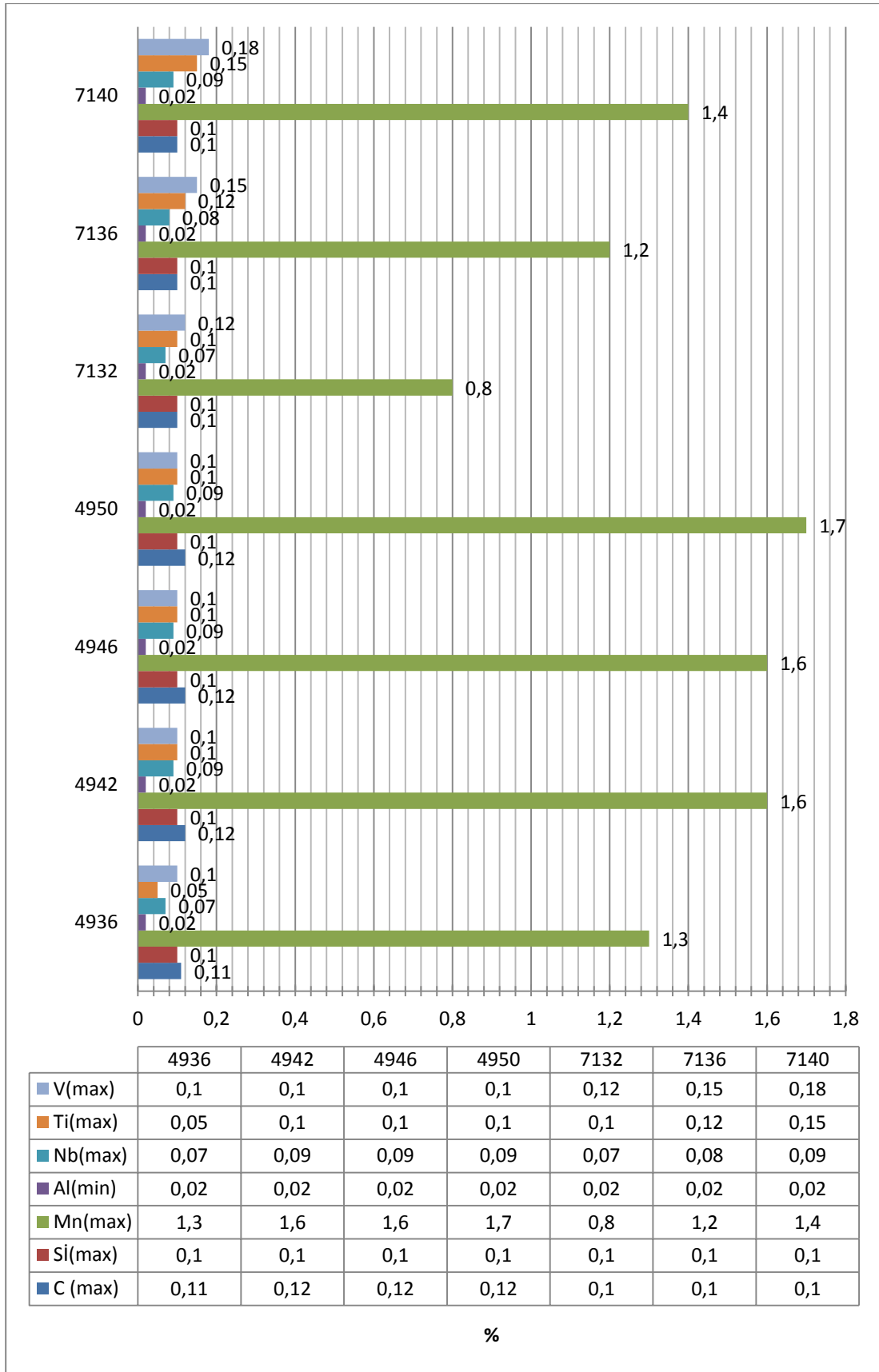
En temel dayanım arttırıcı mekanizma yüksek dayanım düşük alaşım çeliklerde tane küçülmesidir, ama gerekli dayanım seviyesi genelde ferrit içinde ek çökelme sertleşmesi sayesinde elde edilir. VC örneğin ostenit içinde NbC'e göre daha çok çözünürdür. Böylece eğer V ve Nb birlikte kullanılırsa ostenitin ferrite dönüşmesinde NbC tane küçülmesini sağlarken, VC çökelme sertleşmesini sağlar. Şekil 3.1 tipik yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliğin gerilme uzama eğrisi görülmektedir [12].



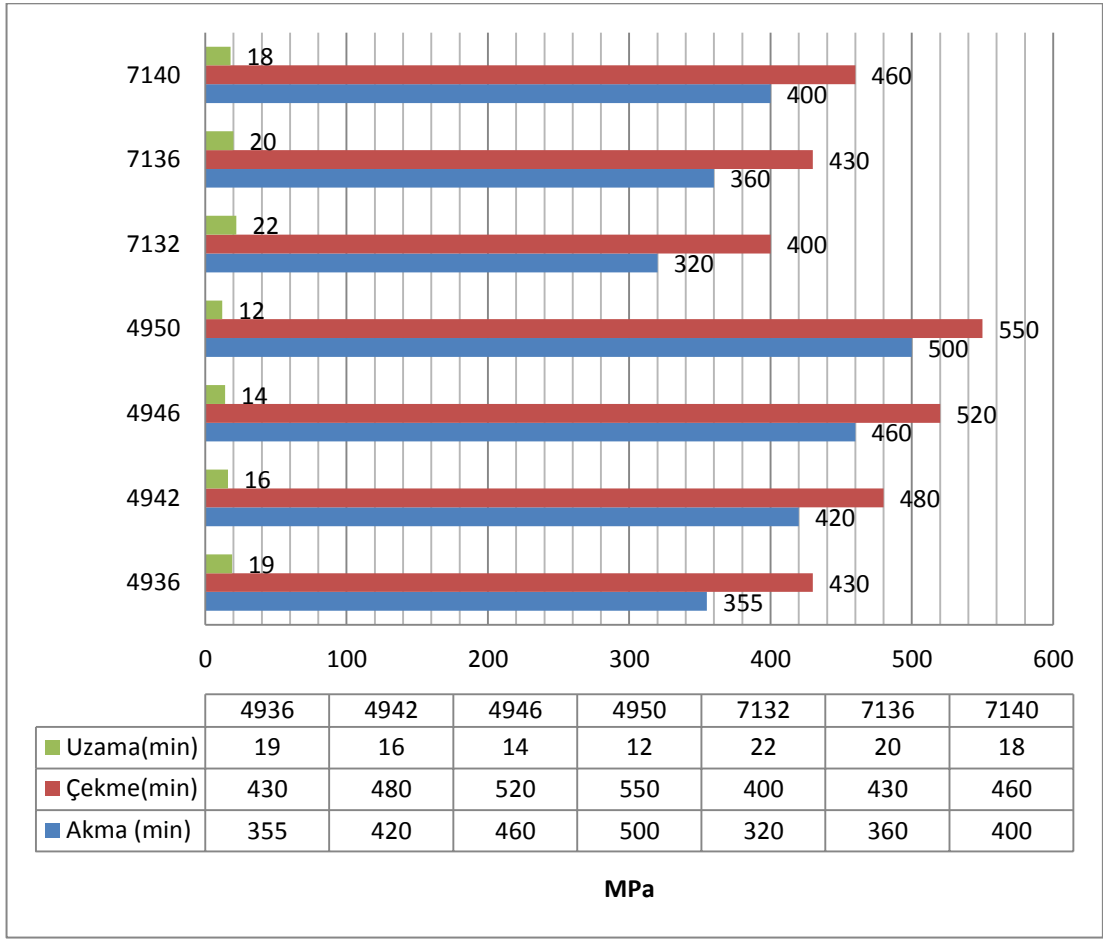
Şekil 3.1 : Düşük karbonlu çelikler, YDDA ve ÇF çelikler için gerilme-uzama eğrileri [12].

Şekil 3.1'de normal çelik, yüksek dayanım düşük alaşım çelik ve çift fazlı çelik için gerilme yüzde şekil değişim grafiği [12].

Mikro alaşımlı malzemeler, boru üretiminde genelde S355MC (EDÇ 4936), S420MC (EDÇ 4942), S460MC (EDÇ 4946), S500MC (EDÇ 4950), soğuk şekillendirmeye uygun yüksek akma dayanımlı sıcak haddelenmiş çelikler ile H320LA (7132), H360LA (7136) , H400LA (7140) olan soğuk şekillendirmeye uygun yüksek akma dayanımlı soğuk haddelenmiş çelikler kullanılmaktadır [13]. Bu çeliklerin Şekil 3.2'de kimyasal, Şekil 3.3'te mekanik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Sıcak ve soğuk EDC mikro alaşımlı çeliklerin kimyasal değerleri.



Şekil 3.3 : Sıcak ve soğuk EDÇ mikro alaşımlı çeliklerin mekanik değerleri.

Sıcak ve soğuk olmak üzere yüzey koşullarına göre iki tip mikro alaşımlı malzeme boru üretiminde kullanılmaktadır. Kaliteler arası mekanik özelliklerdeki farklılıklar termomekanik ve kimyasal içerik farklılığından ileri gelmektedir. Örneğin 4942 ile 4946 EDÇ kodlu malzemelerin standart olarak kimyasal bileşenleri aynı olmasına rağmen 4942 kodlu malzemenin dayanımı daha yüksek olması termomekaniksel işlemler ile açıklanmaktadır. Diğer yandan 7132 ve 7136 EDÇ kodlu malzemelerin dayanımı daha çok Mn, C gibi bileşen oranlarındaki önemli miktardaki artış ile sağlanmaktadır. Dayanımdaki artış uzama değerlerinde azalmayı da getirmektedir.

3.1.2.1 Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik üretimi

Büyük üretim miktarlarında pahalı olmayan ilk yöntem 1856 yılında Bessemer'in bulduğu yöntemdir. Bessemer'in bulduğu fırın sayesinde çelik üretimi hızlanmış ve artmıştı fakat yakmayı başaramadığı fosfor ve kükürt çeliğin istenilen özelliklerde olmasını zorlaştırmaktaydı. 1876 yılında Thomas Bessemer'in kullandığı asit astar yerine bazik dolomit astar kullanarak ham sıvı demiri büyük ölçekte yakmayı başarmış ve sorunu büyük ölçüde çözmüştür [14].

Çelik geçmiş dönemlerde genelde perçinli yapılar için kullanılmaktaydı. 19. yy sonlarında çelik elemanları birleştirmek için elektrik enerjisi ile kaynak fikri doğmuştu. 20 yy. başlarında maliyet azaltma amaçlı perçin yerine kaynak kullanılmaya başlanmasıyla özellikle elektrik kaynağı kaynak teknolojisinde gelişmeler yaşanmıştır. Kaynak teknolojisinin kullanılmaya başlandığı dönemlerde 2. Dünya Savaşı boyunca birçok problemle karşılaşmıştır. Bu problemlere sebep olan etmenlerin araştırılması da bu dönemlerde başlanmıştır. Örneğin T_{pk} , gevrek geçiş sıcaklığı özellikle hacim merkezli kübik yapıli malzemelerde geçiş sıcaklığının altında malzeme aniden gevrek davranış sergilemeye başlamasının bulunması. Araştırmalar Çelikte Fosfor, Kükürt, Azot konsantrasyonundaki artışın kaynak bölgesinde oksidizasyonun ve nitrizasyonun artışına ve kaynakta tane büyümesine sebep olduğunu göstermiştir. Çeliğin metalürjik olarak temiz olması için alaşım elementleri 20.yy ortalarında geliştirilen konverter ve elektrik ark fırınlarında işlem görmektedir.

Sünek gevrek geçiş sıcaklığı (3.1) 'deki şu formülle ifade edilir.

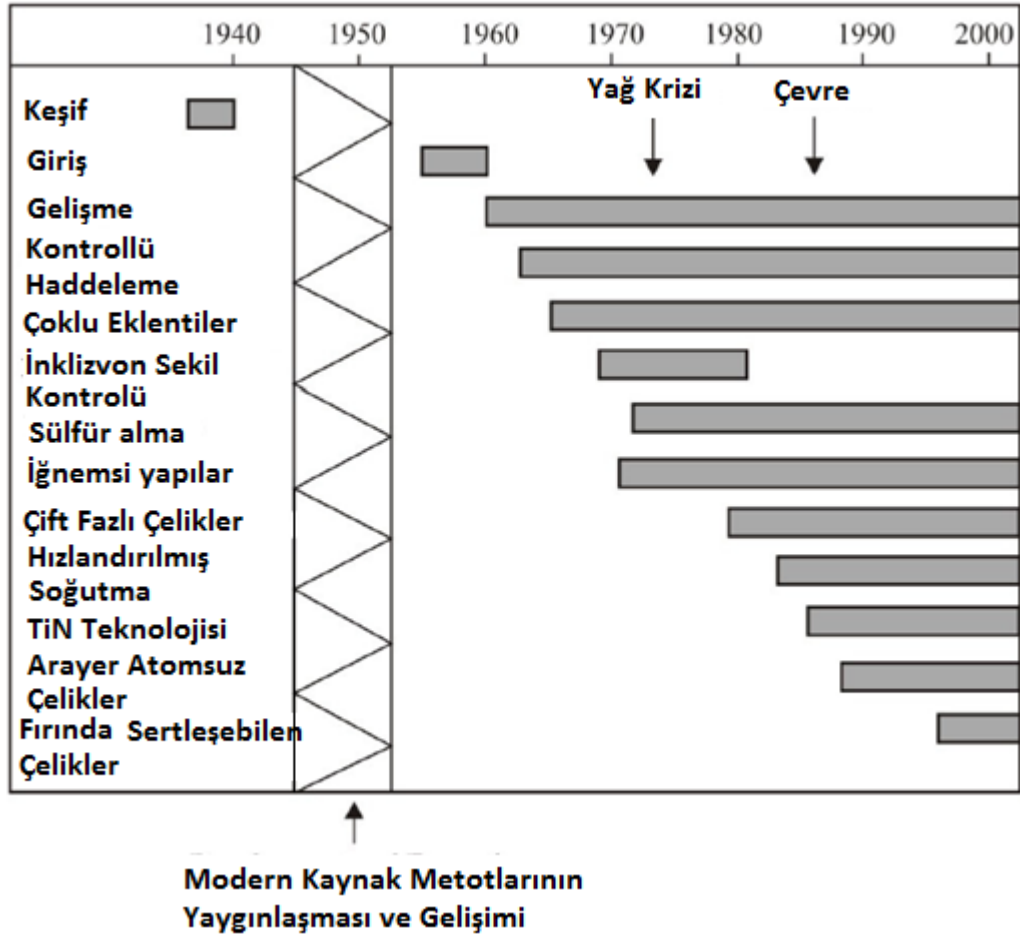
$$T_{pk} = \ln d^{-1/2} \quad (3.1)$$

Tane küçülmesi sayesinde dayanım artışının sağlandığı mikro alaşımlı çeliklerde Hall-Petch bağıntısının akma dayanımı üzerine etkisi (3.2)'deki gibidir.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (3.2)$$

σ_0 : Sabit sayı.

k_y : Sabit.



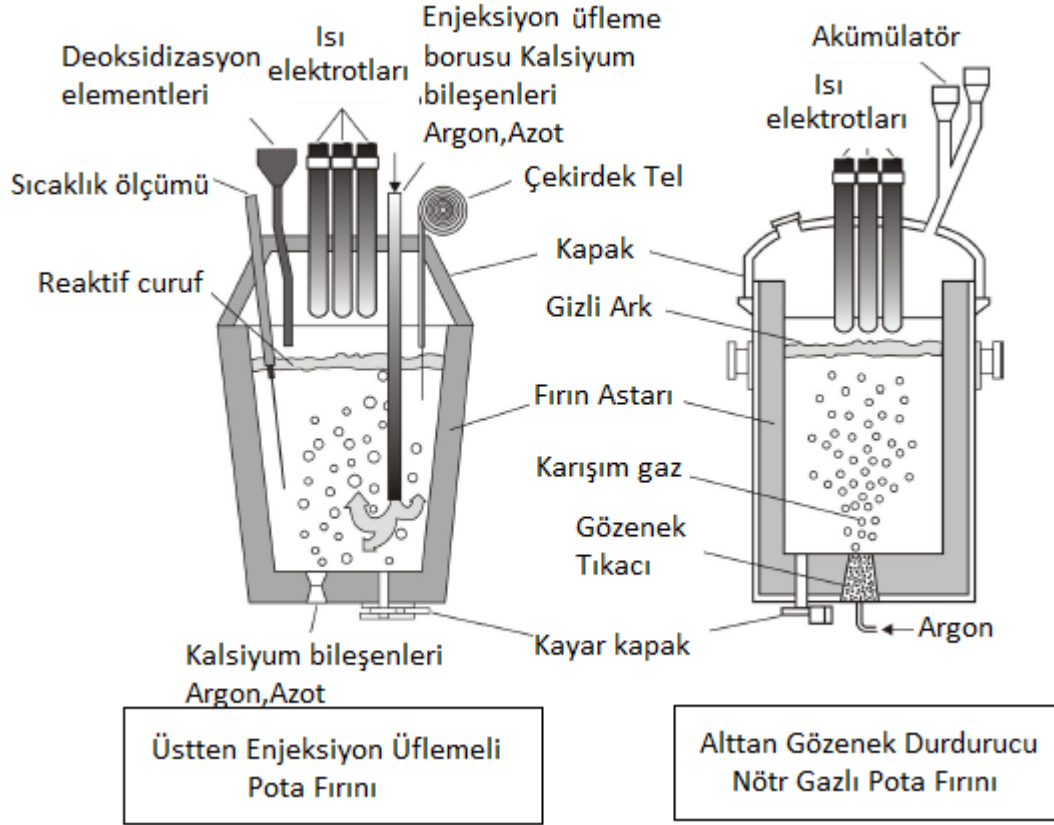
Şekil 3.4 : 1940'dan 2000 yılına YDDA çeliklerin gelişimi [15].

(3.1) ve (3.2) ince taneli yapının mekanik özelliklerini geliştirdiği ve sünek gevrek geçiş sıcaklığını düşürücü etkisi olduğu göstermektedir.

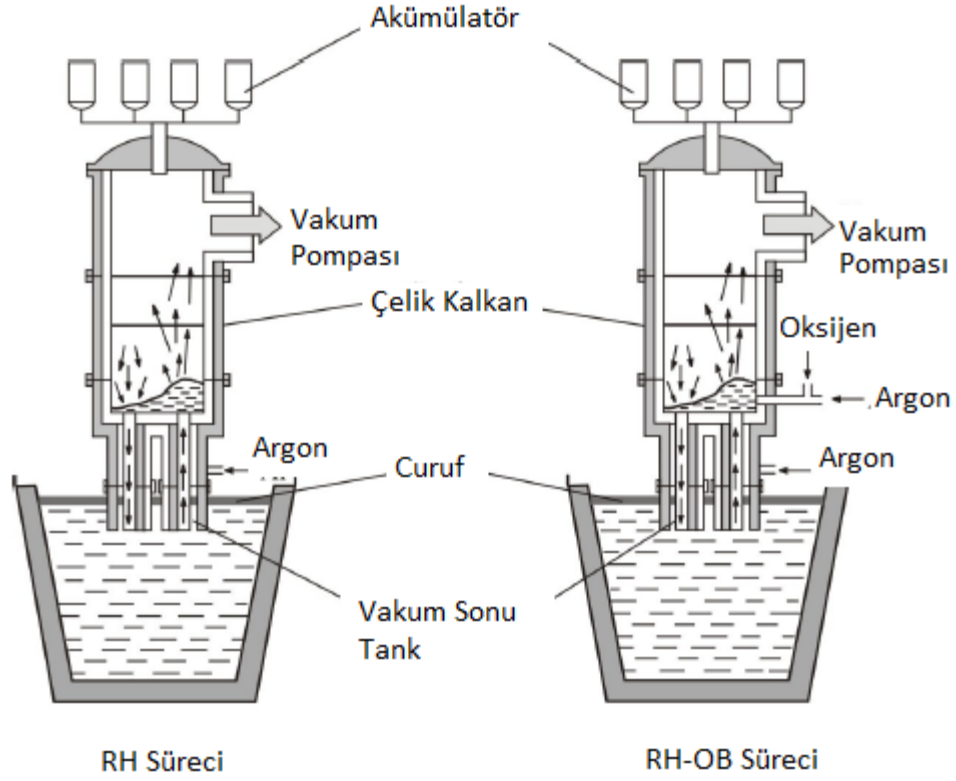
Şekil 3.4'te görüldüğü gibi 1940'dan 2000'e kadar Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerin gelişimi son dönemlerde hızlanmıştır. Bu gelişimin yanında mikro alaşımlı yapı çelikleri kullanımı gittikçe artmaktadır [15].

Mikro alaşımlı çeliklerin atası; kaynaklanabilir % 1.8 Mn ve % 0.2 C yapı çelikleridir. Nb, Ti ve V mikro alaşımlarının yaklaşık % 0.1 kadar bu çeliklere eklenmesi ile MX (M: Nb, Ti, ve V; X: N ve C) ara fazlarının ayırıcı parçacıkları düzgün seçilmiş sıcak çalışma koşullarında konumlandırılır. Çelik prosesi boyunca tekrar kristalleşen ostenit, tane büyümesini sınırlandırır. % 0.005'e kadar eklenen Zr ve B önemli miktarda O ve N'u çekici etkisi vardır. Ti ve Zr elementleri ile S arasında da böyle bir ilişki vardır. Mikro alaşımlar eklenmeden önce eriyik çeliğe düzgün oksijen giderme ve sülfür giderme yapılması gerekir. Bu yüzden oksijen dönüştürme prosesinde veya elektrik ark fırınında yeterli fosfor giderme sonrası çelik

potadaki Şekil 3.5'teki gibi son işleme bağlıdır. Son işlemde oksijen giderme, sülfür giderme için toz maddeler ve metalik olmayan katışıkları modifikasyonu ayrıca alaşım elementleri ve mikro eklentilerin yapıldığı yerdir. Bu maddeler potaya alınmadan evvel nem ve su kristallerini kaldırmak için fırınlanmalıdır. Nem ve suyun alınmaması hidrojenin birikmesine ve hidrojen kırılmalarına neden olur.



Şekil 3.5 : Pota Fırını [15].

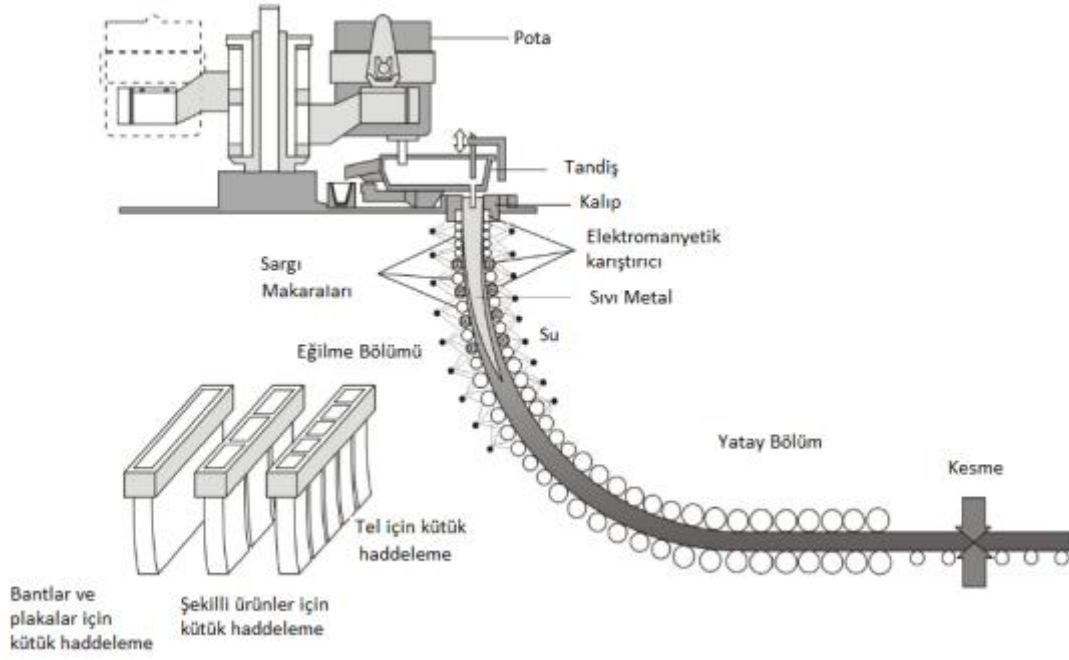


Şekil 3.6 : Vakumla gaz alma süreci [15].

Oksit giderme için Fe-Si, Fe-Mn ve Al, sülfür giderme için yüksek konsantrasyonda CaO (% 30'a kadar Al_2O_3 ve % 5 CaF_2), Ca, CaO, CaSi ve nadiren $CaCO_3$ ve CaC_2 tozları tankın içine aktarılır. Ayrıca alaşım elementleri, mikro eklentiler eklenerek vurdurarak Argon akımı ve nadiren Azot ile vakum gaz alma R-H sirkülasyon prosesi ile döküme hazır hale getirilir.

Eriyik metali ikincil nitrürasyon ve oksidasyon korumak için argon sıcaklığında sürekli döküm methoduyla Şekil 3.6'da görüldüğü gibi vakumla gaz alınmalıdır.

Pota işlemi ve vakumla gaz alma sürecinden sonraki doğru sıcaklıktaki eriyik metal oksidizasyon ve nitrürasyon korumak için Argon atmosferinde sürekli döküm methoduyla (Şekil 3.7) dökülür. Eriyik metal içeren pota barındıran tundiş, arasından soğutma suyu geçen çift duvarlı bakır kalıp, sargı makaraları ve bunlardan bazıları elektromanyetik karıştırıcılar, kütüğü doğrultan eğme makaraları ve kesme bölümünden meydana gelen sürekli döküm sistemine taşınır. Elektromanyetik karıştırıcı kolonsal taneler ve kütük içinde aksel segregasyon gelişimini engellemek için kullanılmaktadır [15].



Şekil 3.7 : Sürekli döküm için teknolojik ekipmanlar [15].

3.1.2.2 Ara yer fazlarının kararlılığı

İnce taneli çeliklerin gelişiminde mikro eklentilerin etkilerini tanımlamak için sıcak işleme durumlarında MX ara yer fazlarının kararlılığını anlamak gereklidir. Ostenit içinde çözünen Mikro eklenti M belli bir T sıcaklığında metal dışı olan X ile bağ oluşturur (3.3).



[M] mikro eklenti (Nb, Ti, V, Zr veya B) ve [X] ametal (N veya C) ostenit katı çözeltisinde belli bir T Kelvin derecesinde çözünür.

MX fazlarının çözünübilirliği (3.4) 'teki bağıntı ile ifade edilir.

$$\log[M] [X] = -\frac{Q}{2,303 \cdot R \cdot T} + \frac{A^1}{2,303} \quad (3.4)$$

Q: MX fazının aktivasyon enerjisi.

R: Gaz sabiti

T: Kelvin cinsinde sıcaklık

A^1 :Faz tipine bağlı sabit

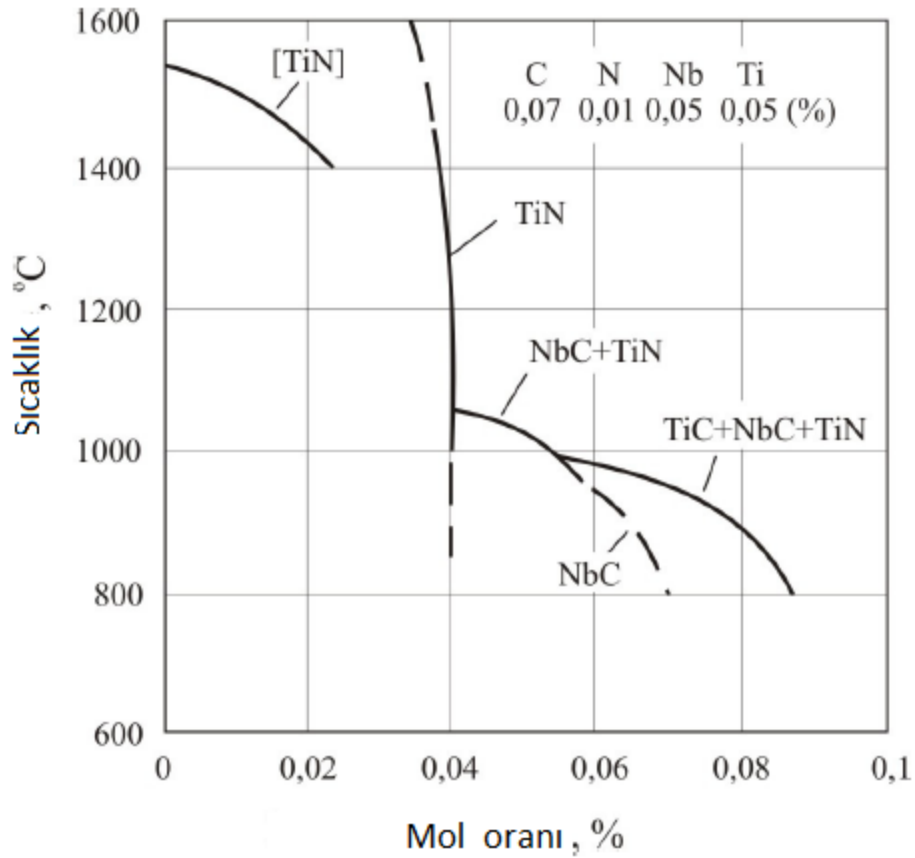
Denklem (3.4) genelde denklem (3.5)'deki gibi gösterilir. A ve B katsayıları Çizelge 3.1'deki gibidir.

$$\log[M] [X] = A - \frac{B}{T} \quad (3.5)$$

Çizelge 3.1 : Seçilen karbür ve nitrürler için A ve B sabitleri [15].

Sabit	MX							
	AlN	VC	VN	TiC	TiN	NbC	NbN	BN
	B	7184	7840	9500	10745	8000	7290	8500
A	1.79	3.02	6.72	5.33	0.32	3.04	2.8	5.24

MX fazlarının ostenit içerisinde çökmesinin başlayacağı ve biteceği sıcaklık bilgisi mikro alaşımlı çeliklerde ısıtıl işlem durumları için çok önemlidir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Ti ve Nb mikro eklentili çeliklerin nitrürlerin ve karbürlerin çökme dereceleri [15].

Segregasyon, malzemenin yerel kimyasal bileşim farklılıklarının parça içinde oluşmasıdır (mikro segregasyon, ağırlık segregasyonu gibi). Segregasyona katılma aralığının geniş, döküm sıcaklığının aşırı yüksek veya soğuma hızının yavaş olduğu durumda rastlanabilir. Bu tip hata homojenleştirme tavı ile giderilebilir ancak çok yüksek sıcaklıklarda uzun süre ısıtım işlemi gerektireceğinden ve tane büyümesi ve çarpılmalar gibi dezavantajlarından dolayı pek tercih edilmez. [16].

C, Mn, S, P ve diğer hafif veya segregasyon duyarlı elementler makroskopik segregasyona neden olur. Makro yapıdaki farklı elementleri göstermek için 3 teknikle segregasyonlar ortaya çıkartılabilmektedir: (a) C için persülfat ayracı, (b) P için oberhoffer ayracı ve (c) S için kükürt filmi. 3 teknikte de genelde orta bölümlerde kenarlara göre daha fazla segregasyon görülmektedir.

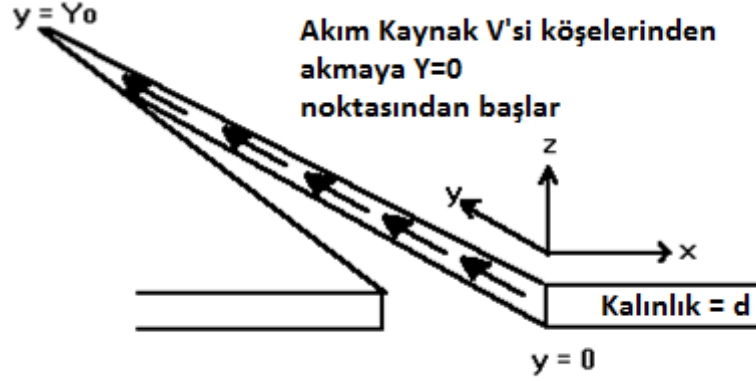
Kenar ve orta bölgelerde mikro yapılar az miktarda perlit ile beraber eş eksenli ferrit tanelerinden oluşmaktaysa sementit filmleri, bazı ferrit tane sınırlarında oluşmaktadır. Ostenit ince filmleri, soğuma boyunca tamamen dejenere olmuş morfoloji ile perlite dönmesiyle oluşmuştur. Ferritin orta bölgede boyuna bantlaşma eğilimi vardır. Kenarlardaki perlit miktarı orta bölgeye göre daha azdır. Kenar ve orta bölge kesişimi ayırt edilebilir. Ferrit zengin bölgelerde sayısız metalik olmayan inklüzyonlar (muhtemelen oksitler) kesişim bölgesinde yer alır. Bu bölgeler sıcak haddeleme boyunca kaynaklanmış ingotun kenar ve orta kesişiminde oluşan kabarcıklardan meydana gelmektedir. Segregasyonun olduğu bölgede karbon oranı daha fazladır. Perlit oranındaki fazlalık yüksek silikon içeriği yüzünden benzer karbon içeriği oluşturacaktır. Her % 0.1 Si arttırmayla % 0.05 C artışı aynı etkiye göstermektedir.

Sülfidler silikatlardan kolayca ayrıştırılabilir. Sülfidler parlak gri görünüştedir Silikatlar siyah görünümündedir [11].

Ferrit-Perlit bantlaşması çelik içerisinde ferritin ve perlitin hadde yönünde uzamasıdır. Bantlaşma sıklığı karmaşık birçok faktöre bağlıdır. Genelde bantlaşma karbon içeriği % 0.1 ile 0.5 arasında olan malzemelerde görülür. Karbon ostenit fazı içerisinde homojen dağılır ancak soğuduğunda ferrit ve perlit bantları oluşturur. Ayrıca A3 sıcaklığını arttıran (örneğin Silikon ve Fosfor) elementleri de ferrit olarak zengin segregasyondan sorumludur. A3 sıcaklığını düşüren elementler (örneğin mangan) da perlit olarak zengin segregasyona sebep olur [11].

4. KAYNAK KALİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

4.1 Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı Sürecinin Matematiksel Modeli



Şekil 4.1 : Isı iletim modelinde kullanılan kaynak V geometrisi [2].

Şekil 4.1’de kaynak V’sinin fiziksel geometrisi model için başlangıç noktasıdır. Isı iletim ve elektrik akım yoğunluk denklemlerini çözebilmek için boru eğimli kenarları ihmal edilip, kenarların x yönünde sonsuz uzunlukta olduğu kabul edilir. Bu şekilde denklemler polar koordinatlar yerine kartezyen koordinatlarda çözülebilir. V sıcaklık dağılımı üzerine çalışmak için ısı iletiminde Biot-Fourier denklemi (4.1) türetilir.

$$K\nabla^2 T - \rho C_p \frac{dT}{dt} + q = 0 \quad (4.1)$$

Elektriksel iletim araçlarında akım yoğunluğu için denklem (4.2) :

$$\nabla^2 \vec{J} - j2\pi\mu\sigma \vec{J} = 0 \quad (4.2)$$

Elektromanyetik olay için Maxwell denklemlerinin doğrudan sonucudur.

Boru ölçüleri ve makine ayarları için değişkenler:

D: Borunun dış çapı

d: Borunun et kalınlığı

v_0 : Makine hızı

y_0 : Kaynak V uzunluğu

f: Elektriksel kaynak frekansı

Boru malzemesi termal özellikleri

T: Malzemenin sıcaklık dağılımı

q: Malzemede oluşan ısı

K: Boru malzemesinin ısı iletim katsayısı

ρ : Malzemenin yoğunluğu

C_p : Malzemenin ısı sığası

Boru elektriksel özellikleri

σ : Boru malzemesinin elektriksel iletim katsayısı

μ : Boru malzemesinin manyetik permabilitesi.

Kaynak V'sinin yüksek frekanslı elektrik akımı akışının yüzey boyunca düzgün ve "Yüzey etkisi" ile limitli kalacak şekilde akımın yüzeyden içeri işleyerek ısındığı varsayılmaktadır.

"Yüzey etkisi" akım yoğunluk denkleminde çıkartılabilecek bir olaydır." Yüksek frekanslar elektiriksel akımların ve manyetik alanların sadece iletken yüzeyinde ince bir katman boyunca oluşmasıdır. Akım yoğunluğu denkleminin doğrudan çözümü akım yoğunluğunun iletken yüzeyinden iç katmana doğru eksponansiyel olarak azaldığını gösterir. Bu azalma oranı iletkenin elektriksel iletkenlik, manyetik permabilite ve elektrik akımın frekansı ile belirlenir. Yüzey derinliği veya elektriksel referans derinliği ξ (4.3) denklemindeki gibidir.

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (4.3)$$

I_0 köşesindeki V içindeki toplam elektrik akımı $y = 0$ 'dan akmaya başlar. Boru malzemesindeki akım yoğunluğu elektrik akım yoğunluğu denklemini çözerek elde edilir (4.4).

$$\vec{J} = \frac{I_0}{d\xi} e^{-\frac{x}{\xi}} \vec{i}_y \quad (4.4)$$

Isı elektrik dirençli güç kaybı ile V köşesinde üretilir. Borudaki güç yoğunluğunun sebep olduğu ısı (4.5) denklemi ile ifade edilir.

$$q_0 = \frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} = \frac{I_0 e^{-\frac{x}{\xi}}}{d^2 \xi^2 \sigma} \quad (4.5)$$

Güç yoğunluğu için efektif “yüzey derinliği” veya e^{-1} derinliği manyetik alan veya elektrik akım için yarısıdır. “Elektrik güç referans derinliği” $\frac{\xi}{2}$ olarak tanımlanacaktır.

Sıcaklık dağılımı “kararlı hal” durumundadır. Isı malzeme taşınımı ile aktarılır (ısı makine hızındaki boru malzemesi ile taşınır). Biot-Fourier denklemi zaman türevi (4.6)’daki gibi değişir.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dT}{dy} \frac{dy}{dt} = v_0 \frac{dT}{dy} \quad (4.6)$$

y makine koordinatlarında kaynak V’si mesafesidir. v_0 makine hızıdır.

Boru bandında ısı iletimi aslında kaynak V’sinde x yönündedir. Isı iletim denklemi tekrar (4.7)’deki gibi yazılabilir.

$$K \frac{d^2 T(x, y)}{dx^2} - \rho C_p v_0 \frac{dT}{dy} + Q_0 e^{-\frac{2x}{\xi}} \mu_{-1}(y) = 0 \quad (4.7)$$

$\mu_{-1}(y)$ birim basamak fonksiyonudur ve elektrik akımı $y = 0$ ’dan başlayarak aktığını göstermek için kullanılır (4.8).

$$Q_0 = \frac{I_0^2}{d^2 \xi^2 \sigma} \quad (4.8)$$

Q_0 , kaynak V’si köşesindeki güç yoğunluğudur.

Diferansiyel denklem kaynak V’si y_0 uzunluğunda kaynak V’si köşesi uzunluğuna kadar olan sıcaklık dağılımı çözülebilir.

Sınır koşulları olarak başlangıç noktası veya çevre sıcaklığı 0 olarak alınmıştır (4.9).

$$T(x, y = 0) = T(x \rightarrow \infty, y) = 0 \quad (4.9)$$

Kaynak V’si köşesinde ısı kaybı olmadığı varsayılmaktadır (4.10).

$$\left. \frac{dT(x, y)}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (4.10)$$

Kaynak V'si dibindeki sıcaklık ΔT olarak tanımlanmıştır (4.11).

$$T(x = 0, y = y_0) = \Delta T \quad (4.11)$$

Kaynak V'si kenar sıcaklığı için sonuç çözümü kritik süreç parametrelerinin fonksiyonu olarak kaynak V'sine uygulanan güç denklemi elde etmek üzere tekrar düzenlenir. Uygulanan toplam güç (4.12) ifadesi ile bulunur.

$$P_0 = 2y_0 dQ_0 \int_0^\infty e^{-\frac{2x}{\xi}} dx = dy_0 \xi Q_0 \quad (4.12)$$

Bu denklemdeki “2” katsayısı Kaynak V'sinde 2 yüzde ısındığından kullanılır. Kritik süreç parametreleri fonksiyonu olarak toplam Kaynak V'si gücü (4.13)'deki gibi bulunur.

$$P_0 = \frac{3\sqrt{\pi}\Delta T y_0 dK}{\xi \sqrt{\alpha} \left[\left(\frac{4y_0 \varepsilon}{\xi^2 v_0 \alpha} + 1 \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{4y_0 \varepsilon}{\xi^2 v_0 \alpha} \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right]} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon = \frac{K}{C_p \rho} \quad (4.14)$$

ε , (4.14) boru malzemesinin termal difüzivitesidir ve α integral yaklaşımından bir sabittir.

$$\frac{4}{\pi} \leq \alpha < 2 \quad (4.15)$$

P_0 denklemi yüksek frekansla boru kaynak prosesi nasıl çalışır ifadesi için bir çok bilgiyi içermektedir. Bu denklemden çıkan ilk sonuç paydada limitli 2 değer oluşturmasıdır (4.15) ve (4.16).

$$\frac{4y_0 \varepsilon}{\xi^2 v_0 \alpha} < ? > 1 \quad (4.16)$$

$\frac{y_0}{v_0}$ Kaynak V'sinde malzemenin küçük bir elemanının ısıya mağruz kaldığı zamandır.

Termal difüzivitesi malzemenin verilen zamanda ne kadar ısının işleyeceğini belirtir.

$\alpha = 4/\pi$ yazılarak:

$$\sqrt{\left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{y_0}{v_0} \right) \varepsilon} < ? > \frac{\xi}{2} \quad (4.17)$$

(4.17) denkleminin sol tarafı termal iletim sayesinde kaynak V'si köşelerinde ısının dağılım mesafesini ifade eder ve malzemenin “Termal referans derinliği” klasik tanımıdır. Denklem sağı tarafı elektrik akımı sayesinde ısınan kaynak V'sini gösterir ve elektrik güç referans derinliği olarak tanımlanır.

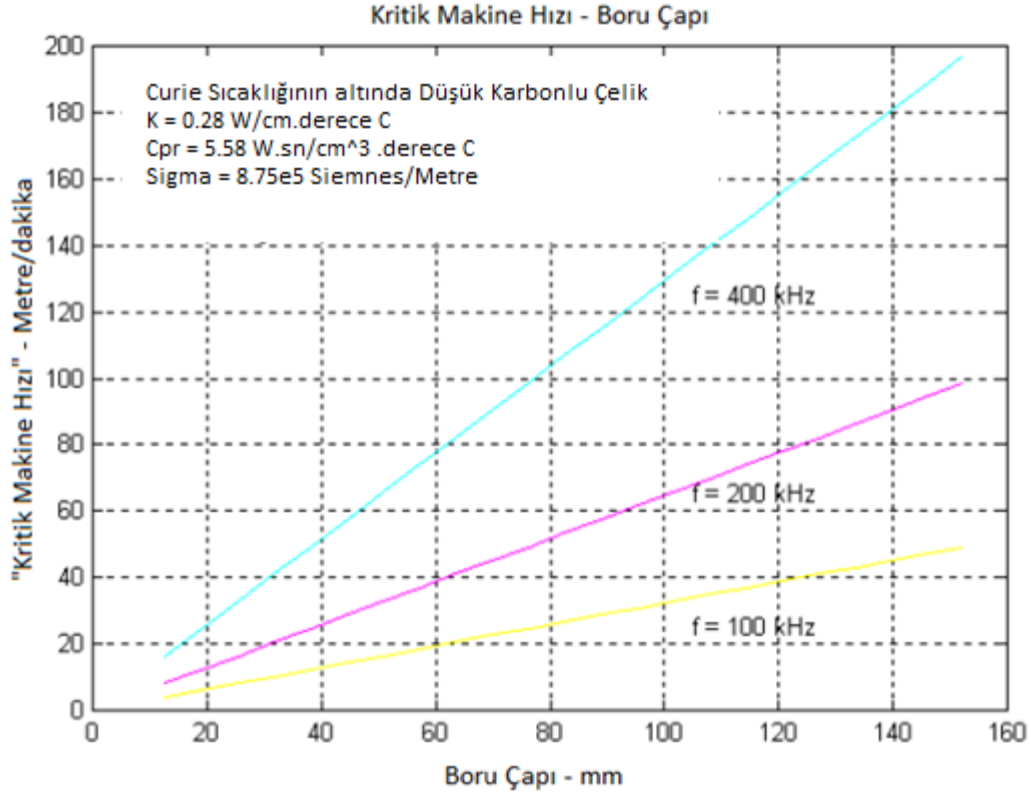
Eğer “ Elektrik güç referans derinliği”, “Termal referans derinliği” değerinden büyükse kaynak sürecinin karakteristikleri elektriksel olarak “yüzey etkisi” ile kontrol edilecektir. Bu da sürecin “Elektrik Güç Modu” içerisinde olduğunu gösterir. Eğer “Termal referans derinliği”, “ Elektrik güç referans derinliği” değerinden daha büyükse kaynak sürecinin karakteristikleri ısı iletilimi ile kontrol edilir. Bu sürecin “ Termal Mod” içerisinde olduğunu gösterir.

Sürecin hangi modda çalıştığına bağılı olarak kritik süreç parametreleri değişmektedir.

Malzeme özellikleri, makine hızı, kaynak frekansı ve kaynak V'si uzunluğu hangi modda çalışıldığını bulmak için girdi olarak kullanılabilir. Kaynak V'si uzunluğunun üretilen boru dış çapında olması gerektiğı önerilmektedir. Kaynak V'si uzunluğu boru dış çapında olduğu kabulü ile “Kritik Makine Hızı” kaynak frekansının ve boru çapının fonksiyonu olacak şekilde eğriler elde edilebilir. Eğer “ Kritik Makine Hızı” üstünde makine çalışılıyorsa , kaynak süreci “ Elektrik Güç Modu” içerisinde çalışıyor demektir. Eğer “ Kritik Makine Hızı” altında makine çalışılıyorsa , kaynak süreci “ Termal Mod” içerisinde çalışıyor demektir.”Kritik Makine Hızı” (4.18)'deki gibi tanımlanır.

$$v_{\text{kritik}} = \pi^2 \mu \sigma \epsilon f y_0 = \pi^2 \mu \sigma \epsilon f D \quad (4.18)$$

D boru dış çapıdır.



Şekil 4.2 : “Kritik Makine Hızı” - Boru çapının fonksiyonu olarak farklı frekanslarda gösterimi [2].

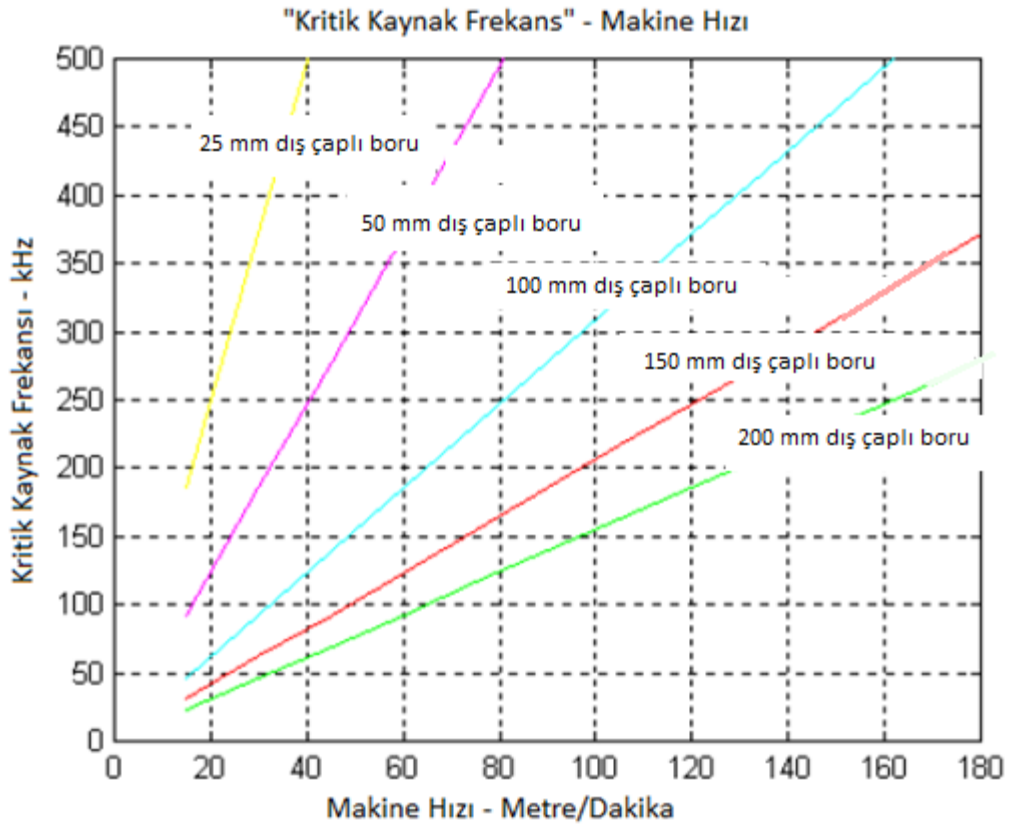
“Kritik Makine Hızı” boru çapının fonksiyonu olarak farklı frekanslarda Şekil 4.2’deki gibi gösterilmiştir.

$\sqrt{\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v_0}{v_0}\right)\varepsilon} <? > \frac{\xi}{2}$ denkleminden “Kritik Kaynak Frekansı” da tanımlanabilir.

“Kritik Kaynak Frekansı” da “Kritik Makine Hızı” gibi iki mod arası geçiş sınırını tanımlar. “Kritik Kaynak Frekansı” altında işletilen kaynak sürecinde “Elektrik Güç Modu” içerisinde bulunduğu, “Kritik Kaynak Frekansı” üstünde işletilen kaynak sürecinde “Termal Mod” içerisinde bulunduğu belirlenmiş olur. “Kritik Kaynak Frekansı” (4.19)’daki gibi tanımlanır.

$$f_{\text{kritik}} = \frac{v_0}{\pi^2 \mu \sigma \varepsilon y_0} \quad (4.19)$$

Eğer kaynak V’si uzunluğu boru dış çapına eşit ise, “Kritik Kaynak Frekansı” makine hızının fonksiyonu olarak farklı boru çaplarında eğri Şekil 4.3 ‘deki gibi çizdirilebilir.



Şekil 4.3 : “Kritik Kaynak Frekansı” makine hızının fonksiyonu olarak gösterimi [2].

Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ısınmayı kontrol eden moda göre “referans derinliği” değerinin 2 katına yaklaşık eşit olacağı varsayılabilir.

Çizelge 4.1 : Termal, Geçiş ve Elektrik Güç modunda güç, ITAB bölgesi genişliği formülleri.

	TERMAL MOD	GEÇİŞ BÖLGESİ	ELEKTRİK GÜÇ MODU
ŞART	$f_{işletme} \gg f_{kritik}$	$f_{işletme} = f_{kritik}$	$f_{işletme} \ll f_{kritik}$
P_0	$P_0 = \Delta T d \sqrt{\pi y_0 K C_p \rho v_0}$	$P_0 = 1,81 \cdot \Delta T d \sqrt{\pi y_0 K C_p \rho v_0}$	$P_0 = \frac{\Delta T C_p \rho d v_0}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$
ITAB	$ITAB = \sqrt{\pi \left(\frac{y_0}{v_0}\right) \epsilon}$		$ITAB = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$

Çizelge 4.1’deki sonuçlara göre “Kritik Kaynak Frekansı” altında çalışılması durumunda kaynak frekansındaki artış kaynak gücü gereksinimini ve ısı tesiri altındaki bölgenin genişliği azaltacaktır. ”Kritik Kaynak Frekansı” üstünde çalışıldığı durumda güç gereksinimi ve ısı tesiri altındaki bölge frekanstaki değişime

duyarlılığını kaybeder. Tabloda da görüldüğü gibi “Kritik Kaynak Frekansı” değerinde çalışılması bu değerden daha yüksek frekans değerinde çalışılmasına göre %80 daha fazla güç harcanacağını göstermektedir. ”Kritik Kaynak Frekansı” altında çalışılması da yine daha yüksek güç gereksinimi ve daha geniş ısı tesiri altında bölge anlamına gelmektedir. Curie sıcaklığının altındaki boru malzemesinde ”Elektriksel referans derinliği” et kalınlığının 1/5’i olacak şekilde kaynak frekansı seçilmelidir.

Süreç “Elektrik Güç Modu” içerisinde çalışıyorsa, kaynak gücü boru malzemesi ısı katsayıları ve makine hızı ile bire bir değişir. ”Termal Mod” içerisinde çalışılıyorsa kaynak gücü bu değerlerin kare köküne bağlı olarak değişir. Aynı zamanda “ Elektrik Güç Modu” içerisinde kaynak gücü boru malzemesi elektriksel katsayıları ve kaynak frekansı ile ilişkilidir. ”Termal Mod” içerisinde ise süre bu değerlerden bağımsızdır. Yani Sürec ”Termal Mod” içinde çalıştırılırsa “ Elektrik Güç Modu” tersi olarak süreç parametrelerine çok daha az duyarlı olacaktır.

Kaynak sıcaklığını sağlayan gücü aktaracak uygun empeder için gerekli manyetik akı da hesaplanabilir.

$$Q_0 = \frac{I_0^2}{d^2 \xi^2 \sigma} \quad (4.20)$$

$$P_0 = 2y_0 d Q_0 \int_0^\infty e^{-\frac{2x}{\xi}} dx = dy_0 \xi Q_0 \quad (4.21)$$

(4.20) ve (4.21) denklemleri ile (4.22) denklemi oluşturulur.

$$P_0 = \frac{3\sqrt{\pi} \Delta T y_0 d K}{\xi \sqrt{\alpha} \left[\left(\frac{4y_0 \varepsilon}{\xi^2 v_0 \alpha} + 1 \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{4y_0 \varepsilon}{\xi^2 v_0 \alpha} \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right]} \quad (4.22)$$

baskı sıcaklığını alışturmaya yetecek kaynak V’si akımını göstermek için tekrar yazılabilir. Kaynak V’sindeki manyetik akı hesaplanmasında kullanılabilir. Gauss yasası empeder akısını hesaplamak için kullanılmıştır (4.23).

$$|B_{\text{empeder}}| = \left[\frac{A_{\text{kaynak V'si}}}{A_{\text{empeder}}} \right] \mu_0 \sqrt{\frac{3\sqrt{\pi} \Delta T y_0 d K}{2 \left[\left(\frac{f}{f_{\text{kritik}}} + 1 \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{f}{f_{\text{kritik}}} \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right]}} \quad (4.23)$$

$|B_{\text{empeder}}|$: empederdeki manyetik akı büyüklüğü

$A_{\text{kaynak } V'si}$: Kaynak $V'si$ alanı

A_{empeder} : Empederin kesit alanı

μ_0 : Uzayda manyetik geçirgenlik

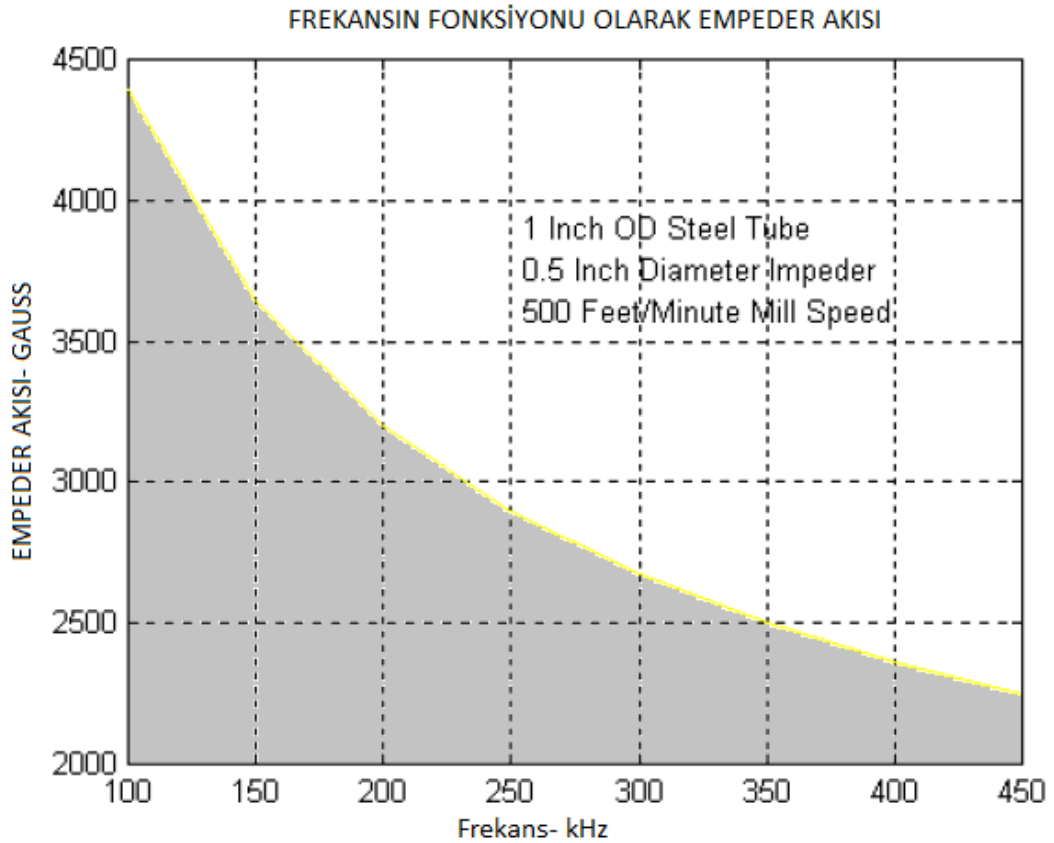
“Elektrik Güç Modu” içerisinde empeder akısı (4.24) denklemindeki şekildedir.

$$|B_{\text{empeder}}| \cong \left[\frac{A_{\text{kaynak } V'si}}{A_{\text{empeder}}} \right] \mu_0 \sqrt{\frac{\Delta T C_p \rho v_0}{\pi \mu y_0 f}} \quad (4.24)$$

“Termal Güç Modu” içerisinde empeder akısı (4.25) denklemindeki şekildedir.

$$|B_{\text{empeder}}| \cong \left[\frac{A_{\text{kaynak } V'si}}{A_{\text{empeder}}} \right] \mu_0 (\Delta T)^{1/2} \left[\frac{K C_p \rho \sigma v_0}{\mu y_0 f} \right]^{1/4} \quad (4.25)$$

Bu denklemler kaynak frekansı “ Elektrik Güç Modu” “Termal Mod” geçişine kadar arttıkça empeder akısının $f^{-1/2}$ katı olarak azalacağını göstermektedir. Bu noktadan sonra empeder akısı $f^{-1/4}$ ladar daha düşük bir hızla azalmaya devam eder.



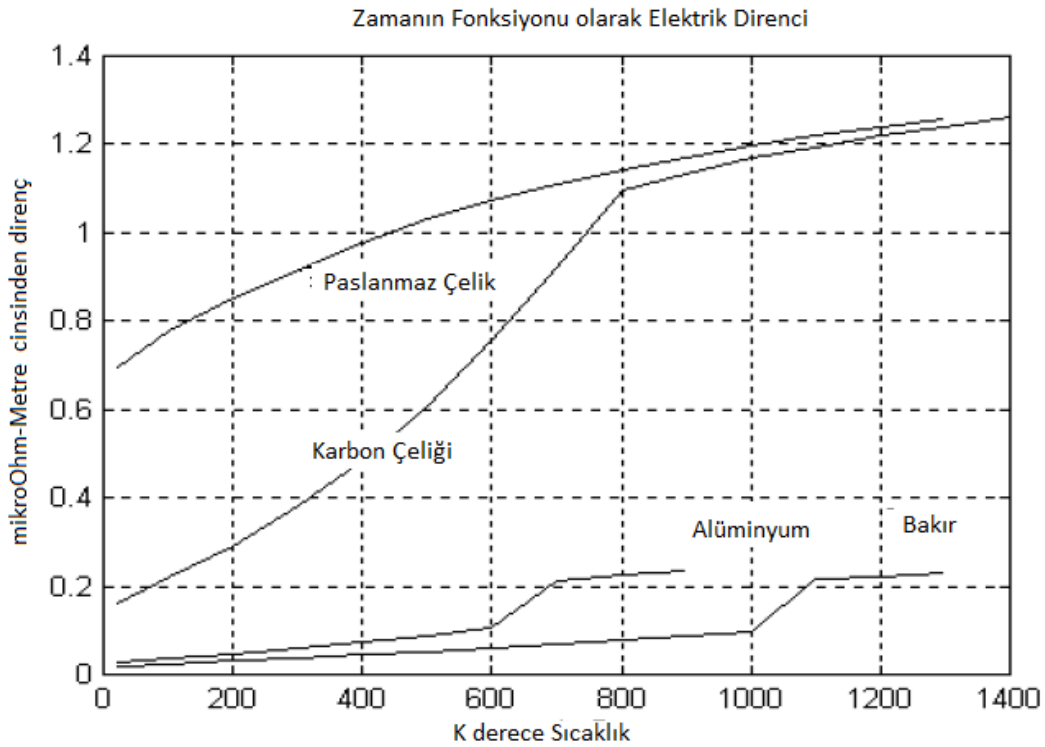
Şekil 4.4 : Empeder manyetik akısı – Kaynak frekansı [2].

Şekil 4.4'te empedor manyetik akısı frekansın fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Bu bölümde ortaya konulan matematiksel modelden de görülebileceği gibi “Termal Mod” ve “ Elektrik Güç Modu” olmak üzere iki tipte kaynak sürecinden “Termal Mod” bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar şöyledir:

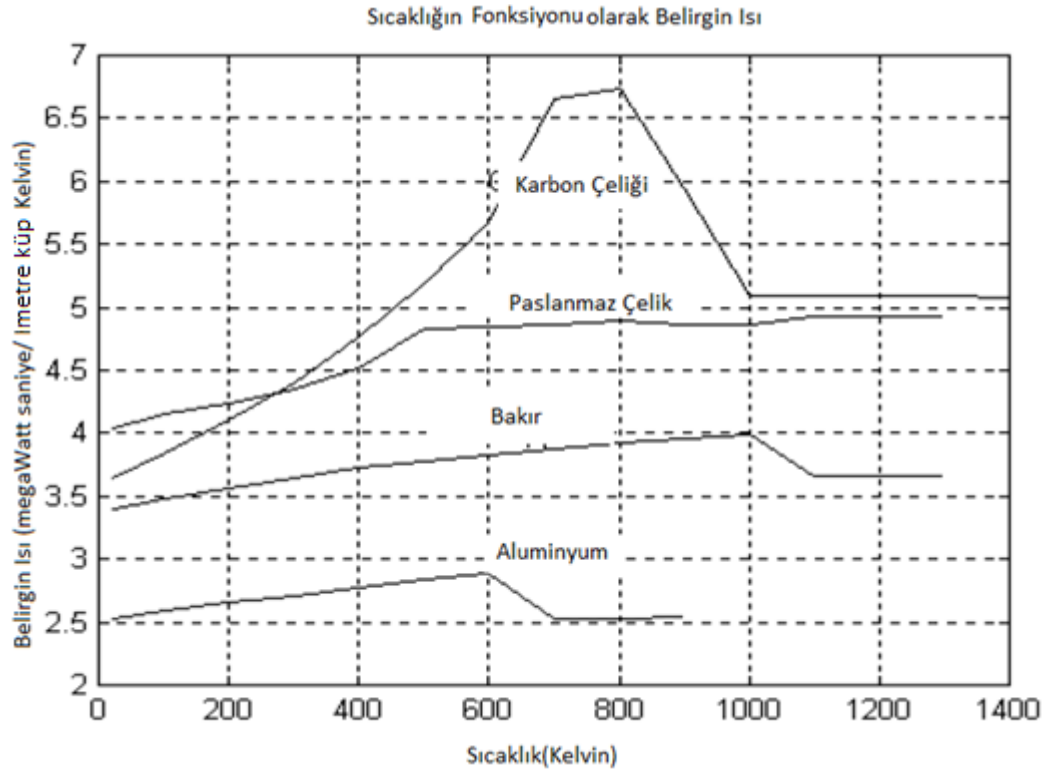
- Düşük yüksek verimde daha düşük kaynak güç gereksinimi.
- Isı tesiri altındaki bölgenin daha dar olması ve daha iyi kaynak kalitesi.
- Süreç parametrelerindeki değişimden en az etkilenilmesi.
- Empeder akı doyumuna ulaşana kadar maksimum faydayı sağlayacak şekilde daha düşük manyetik akı seviyesi [2].

4.2 Düşük Karbonlu Çeliklerin YF Kaynağı

Düşük Karbonlu çelikler boru üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip çelikler farklı sıcaklık aralıklarında farklı iki malzeme gibi davranmaktadır. 500 °C altında kayda değer manyetik geçirgenlik göreceli düşük elektrik direnci ve yüksek çekme dayanımı gösterir. 800 °C yukarısında ise serbest uzaydaki manyetik geçirgenlikte göreceli olarak yüksek elektrik direnci (yaklaşık oda sıcaklığındaki durumun 5 katı) ve düşük çekme dayanımı özellikleri gösterir (Şekil 4.5, 4.6) .



Şekil 4.5 : Zamanın fonksiyonu olarak elektrik direnci [2].



Şekil 4.6 : Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlılığı [2].

500 °C’de yüksek manyetik geçirgenlik ve düşük elektrik direnci yüzünden elektriksel referans derinliği (yüksek frekans akımının yüzeyden içeri işleyeceği derinlik) çok küçüktür. Bu esnada ısınma kaynak V’si köşelerinin daha çok yüzeyinde oluşur; çünkü akım, bu bölgede yüksek miktarda konsantre olmuştur ve sıcaklık çok çabuk yükselmektedir. Kaynak V’si apeks noktasına doğru sıcaklığın 800 °C üstüne ulaştığı yerde manyetik geçirgenlikteki kayıp ve artan elektrik direnci, elektriksel referans derinliğinde birkaç mm artışa neden olur. Yüksek frekans akımı Kaynak V’si köşeleri içinde daha derine işler ve yüksek frekans ısı daha geniş bir hacme dağılır. Kaynak V’si apeksine doğru ısınma hızı azalır ve kaynak V’si köşelerinden gittikçe daha fazla derinliğe ulaşır [17].

4.3 Kaynaklanabilirlik

Alaşım elementi kaynaklanabilirliği karbon kadar olmasa da azaltır. Karbon eşdeğeri alaşımsız çelikler için kaynaklanabilirlik değeri olarak ifade edilir. Uluslararası kaynak enstitüsü forumülü (4.26) denklemindeki gibidir.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (4.26)$$

Bu formül geleneksel yapı çelikleri göreceli olarak yüksek karbon içerikliler için uygundur. Düşük alaşımlı, Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı çelikler için Itoh ve Bessyo tarafından geliştirilen kaynak çatlak parametresi denklem (4.27) daha uygundur.

$$Pcm = C + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (4.27)$$

Kabul edilebilir değer ön ısıtmasız kaynak bölgeleri için $Pcm < 0.4$ 'tür [18].



Şekil 4.7 : H400LA kalite 1.5 mm et kalınlığındaki bandın metalografik muayenesinde görülen segregasyon bandı.

$$Pcm = 0.09 + \frac{1.22 + 0.0366 + 0.0250}{20} + \frac{0.02}{30} + \frac{0.0406}{60} + \frac{0}{15} + \frac{0.0487}{10} + 5 \times 0.0001 = 0.16207$$



Şekil 4.8 : H320LA bandında kalite 1.5 mm et kalınlığındaki bandın metalografik muayene görüntüsü.

$$P_{cm} = 0.06 + \frac{0.37 + 0.0618 + 0.0267}{20} + \frac{0.05}{30} + \frac{0.0537}{60} + \frac{0.0011}{15} + \frac{0.0031}{10} + 5 \times 0.0001 = 0.08793$$

Şekil 4.7 ve 4.8'deki malzemelerin P_{cm} hesaplarında görüldüğü gibi H400LA Mn oranındaki 4 katlık artış P_{cm} oranında önemli miktar artışa sebep olmuştur. Mn miktarında bu miktar artışı bandın kendisinden gelen ya da ısı tesiri altında belirginleşen segregasyon oluşma olasılığı artmaktadır.

4.4 Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynağı Kaynak Hataları

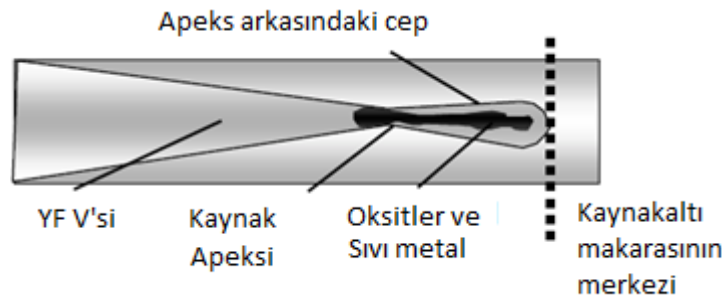
Çelik boru üretiminde en hızlı ve verimli olan yüksek frekans indüksiyon yöntemi ile kaynak yönteminde genelde karşılaşılan 9 tip hata mevcuttur. Bu hatalar endüstride farklı isimlerle adlandırılabilir.

- 1- Tutulmalar (Siyah Kalıntılar)
- 2- Ön Arklar (Beyaz Kalıntılar)
- 3- Eksik Ergime (Açık Kaynak)
- 4- Köşelerde Eksik Ergime (Büzüşme)
- 5- Merkezde Eksik Ergime (Soğuk Merkez)
- 6- Yapışık Kaynak (Soğuk Kaynak)
- 7- Döküm Kaynak (Gevrek Kaynak)

- 8- Porozite (İğne Deliği)
- 9- Kademeli Kaynak Zayıflığı [19].

4.4.1 Tutulmalar (Siyah kalıntılar)

Metal Oksitlerin genelde ferrit bölgesinden atılmaması sebebiyle oluşur. Bu oksitler eriyik metal köşeleri yüzeyinde oluşur. Eğer bant kenarlarının yaklaşma hızı ergime hızından daha az ise yani köşelerin ergimesi sıkıştırılmasından daha hızlı gerçekleşirse. Cep formunda kaynak V'si önünde ergimiş metal ve metal oksit bir arada bulunacaktır. Normal bir sıkıştırma sonucunda normal seviyede ergimiş metal dışarı atılamayacağından tutulmalar Şekil 4.9'daki gibi meydana gelecektir.



Şekil 4.9 : Siyah kalıntı hatası [19].

Tutulmalar (Siyah kalıntılar) kaynak dikişinden açma olduğunda kolayca gözlemlenebilir. Tutulmaların yüzeyi genelde siyah renkli ve kaynak dikişine göre daha düzgündür. Kaynak V'si dar ise örneğin 4 dereceden küçükse veya kullanılan malzemenin Mangan'ın Silikon'a oranı 8:1'den daha az ise bu tip hata görülme riski yüksektir.

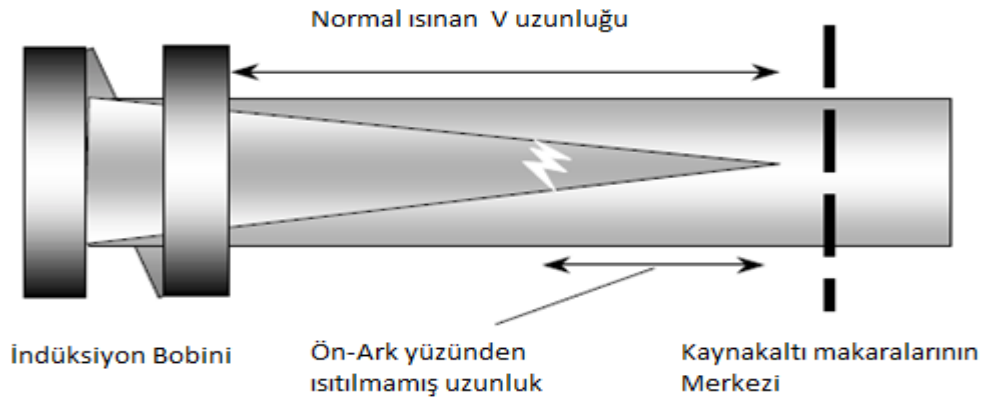
Bu tip hatayı önleyici tedbirler:

- 1- 4-6 derece kaynak V'si açısını elde edilmesi.
- 2- Düzgün ve tutarlı kaynak V'si ve makine ayarlarının elde edilmesi.
- 3- Soğuk kaynağın oluşmayacağı şekilde en düşük kaynak sıcaklığını elde edilmesi.
- 4- Mn/Si oranının 8:1'den daha az olan çeliklerin kullanılmaması.

4.4.2 Ön arklar (Beyaz kalıntılar)

Bu tip bir hatada aslında herhangi bir kalıntı söz konusu değildir. Çok kısa bir bölgede ön arklar sebebiyle oluşmuş kaynaksız bölgelerdir. Şekil 4.11'deki gibi ön ark, yüksek frekans akımı kaynak V'si köşesinden atlamasıyla oluşur. Kısa devre akımı anlık olarak yönlendirir ve kaynak ısısının ara bölgede oluşmamasını sağlar.

Çok kısa süreli akımın yön değiştirmesi genelde uzunluğu et kalınlığından fazla olmayan kısa hataların oluşmasına sebep olur. Kaynak dikişinden bu hata sebepli açma olduğunda düz ve parlak bir yüzey kaynak bölgesinin geriye kalan kısmında lifli kırıklı yüzeyle çevrili olduğu görülür.



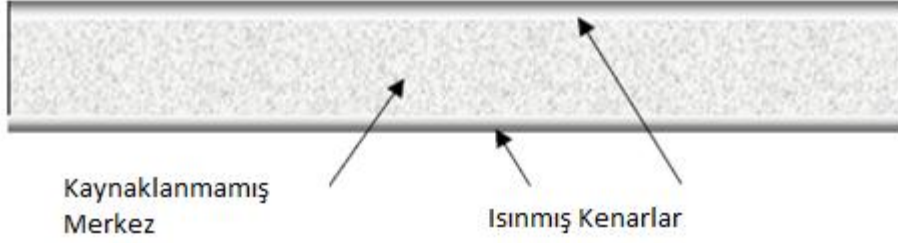
Şekil 4.10 : Beyaz kalıntı hatası [19].

Bu tip hatayı önleyici tedbirler:

- 1- 4-6 derece Kaynak V'si açısını elde edilmesi.
- 2- Kenar çapağını azaltmak için dilme kalitesini iyileştirilmesi.
- 3- Bant kenar hasarlarını azaltıcı elleçleme yöntemini iyileştirilmesi.
- 4- Temizi soğutma sıvısı ve doğrudan kaynak bölgesine tutulmaması.

4.4.3 Eksik ergime (Açık kaynak)

Açık kaynak kenarları Şekil 4.12 'de görüldüğü gibi genelde bir miktar ısı girdisini gösteren mavi renkli kenarlar olarak kendini gösterir. Bu tip bir hatanın asıl nedeni yetersiz kaynak ısısı ve buna bağlı diğer faktörlerdir. Güç ayarları, kaynak V açısı ve uzunluğu, empedor konumu ve durumu, indüktör boyut kaynak gücünü etkiler. Bu faktörler bireysel etkiyebildiği gibi toplu olarak da etkiyebilir.



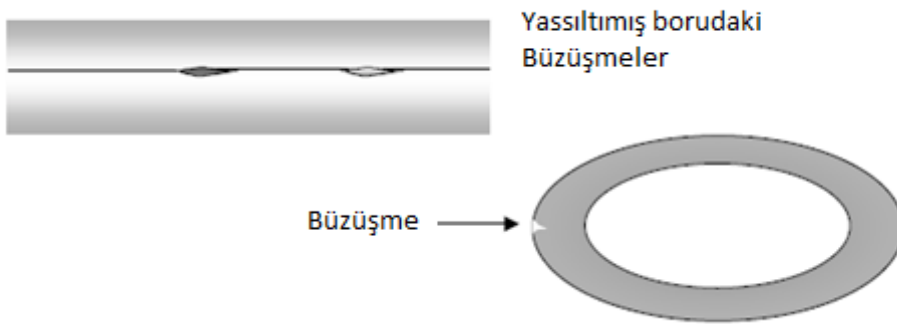
Şekil 4.11 : Açık kaynak hatası [19].

Bu tip hatayı önleyici tedbirler:

- 1- Geçerli güç ayarları hız ve malzeme ile tutarlı olmalıdır.
- 2- Empeder kaynak makarası merkezini 3 mm ileriye doğru geçmeli ve soğutulmalıdır.
- 3- Kaynak V'si boru dış çapından fazla tutulmamalıdır.
- 5- Kaynak V açısı 7 dereceyi aşmamalıdır.
- 6- İndüktör iç çapı boru dış çapından 6 mm'den daha fazla olmamalıdır.
- 7- Bant genişliği üretilcek boru çapına uygun ve tutarlı olmalıdır.

4.4.4 Köşelerde eksik ergime (Büzüşme)

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi eksik ergime ferrit bölgesinden metalik olmayan parçacıklar sebebiyle bant kenarlarında kaynağı oluşturacak ergimenin eksik olması ile oluşur. Saat 3 yönündeki yassılma testinde görünen şekil itibariyle büzüşme olarak da adlandırılmaktadır.



Şekil 4.12 : Köşelerde eksik ergime [19].

Kırık yüzeyi siyah ve düzdür. Eğer kırık yüzey gümüş renkli ise bu hata dış kenarların iç kenarlar gibi ergitilemediğinin de göstergesidir. Büzüşme hatası tutulma ve eksik ergime hatalarının birleşimi olarak kabul edilebilir.

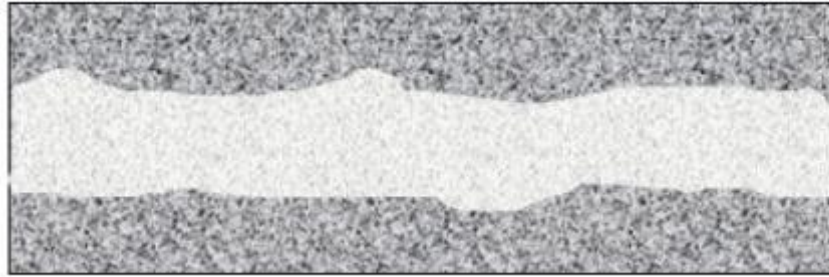
Bu tip hatayı önleyici tedbirler:

- 1- Düz paralel kenarların elde edilmesi.
- 2- Daha fazla malzemenin kaynak bölgesinden dışarı atılması.
- 3- Eğer büzüşme gümüş renkli ise daha fazla kaynak ısısı verilmesi.

4.4.5 Merkezde soğuk ergime (Soğuk merkez)

Şekil 4.13 'de görüldüğü gibi soğuk merkez hatasına sahip eksik ergimiş bölge kırıldığında, kırılmış yüzeyin orta bölümü düz, donuk, gümüş renginde bir bant olarak görünür. Kenar bölgeler ise liflidir. Bu durum verilen kaynak gücüne göre yüksek hızda gidildiğinde orta çıkmaktadır. Tüm kesiti ısıtacak kadar yeterli zaman bulamadığının ve yeterli derinliğin elde edilememiş bir kaynağın oluşup soğuk kaynaklı merkezde bir yapının oluştuğunu göstermektedir.

Soğuk merkez hatası yeterli ergimiş metalin dışarı atılmaması ile de oluşabilir.



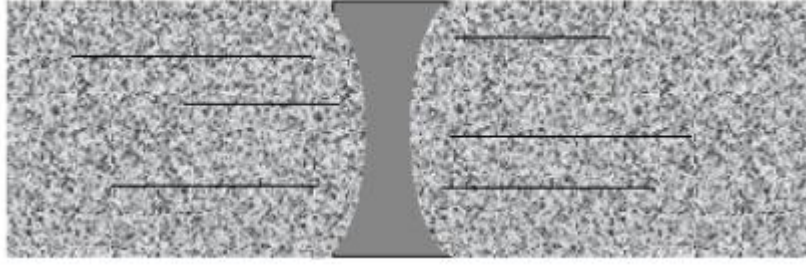
Şekil 4.13 : Soğuk merkez hatası [19].

Bu tip hatayı önleyici tedbirler:

- 1- Kaynak gücünü arttırılması.
- 2- Kaynak upsetinin arttırılması.
- 3- Kaynak V uzunluğunun arttırılması veya hat hızının yavaşlatılması.

4.4.6 Yapışık kaynak (Soğuk kaynak)

Şekil 4.14 'de görüldüğü gibi Soğuk Kaynak Yüksek frekans indüksiyon kaynağı hatalarının belkide en tehlikelidir. Çünkü tahribatsız test metotları işe görülemez. Kaynak kesitinden yapılan metalografik muayenede çok dar ITAB bölgesi görülür ve ferrit çizgisi yok olmuştur.



Şekil 4.14 : Soğuk kaynak [19].

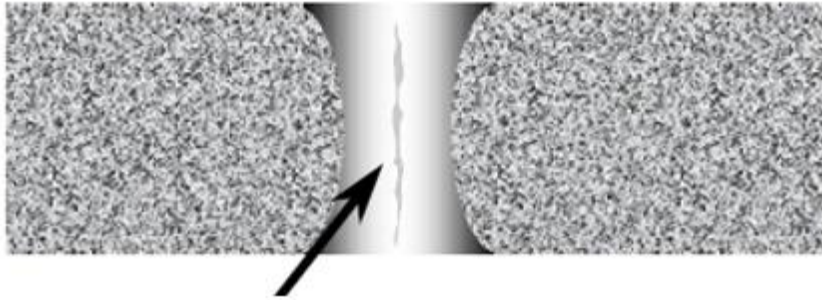
Bu tip hatayı önleyici tedbirler:

- 1- Makine hızına ve ayarlarına uygun kaynak akımının uygulanması.
- 2- Yeterli kaynak baskısının oluşturulması ve/ veya bant genişliğinin artırılması.

4.4.7 Döküm kaynak

Şekil 4.15 'de görüldüğü gibi döküm kaynak ergimiş metalin kaynak bölgesinden atılamaması ile oluşan bir hata türüdür. Metal oksitler kalıntılara benzer içeriklerin olduğu ferrit bölgesi döküm yapıda oluşur. Kırılan yüzeyin görüntüsü döküm metal kalıntısı miktarına göre değişir ama genelde düz ve kırılkan bir görünümüdür. Kaynak kesitinden bakıldığında döküm yapı kolaylıkla görülebilir.

Döküm kaynak genelde genişletme ve yassılma testini geçemez.



Kaynak bölgesinin sıkıştırılması esnasında dışarı atılamamış eriyi metal

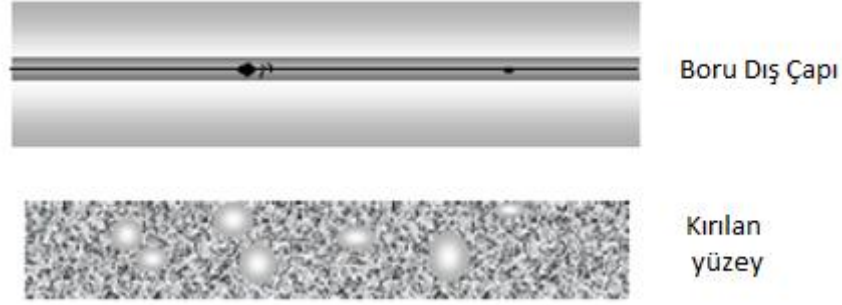
Şekil 4.15 : Döküm kaynak hatası [19].

Bu tip hatayı önleyici tedbirler:

- 1- Kaynak baskısının artırılması.
- 2- Bant genişliğinin artırılması.

4.4.8 Porozite (İğne deliği)

Şekil 4.16 ‘da görüldüğü gibi porozite ferrit bölgesindeki porozite yüksek kaynak sıcaklıkları ve yetersiz kaynak baskısının göstergesidir. Kırılan yüzey parlak lifli, küresel rastgele dağılmış köşelere doğru hataları içerir. Dış kenarlara açılan bu delikler oksidasyon yüzünden siyah renlidir. Küçük iğne delikleri çapak alma sonrası görülebilir.



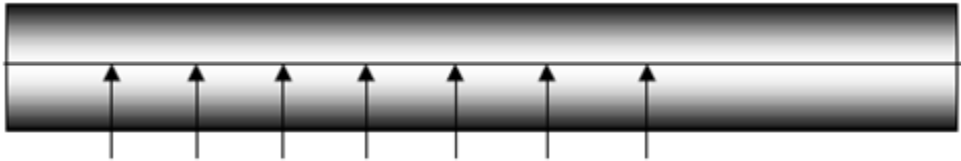
Şekil 4.16 : Porozite hatası [19].

Bu tip hatayı önleyici tedbirler:

- 1- Kaynak sıcaklığını azaltmak.
- 2- Kaynak baskısını arttırmak.

4.4.9 Kademeli kaynak zayıflığı

Şekil 4.17 ‘de görüldüğü gibi kademeli kaynak zayıflığı, kaynak kenarlarına hat gücü frekansı gibi periyodik sebepler neden olabilir. Hatalı makaralar veya şaftlar da periyodik hatlara sebep olabilir.



Düzenli bir periyot ile tekrar eden hatalar

Şekil 4.17 : Kademeli kaynak zayıflığı hatası [19].

Bu tip hatayı Önleyici Tedbirler

- 1- Kaynak akımına ek filtreleme yapılması.
- 2- Gelen fazlardaki voltajların kontrolünün yapılması.
- 3- Makara ve şaftların kontrolünün yapılması [19].

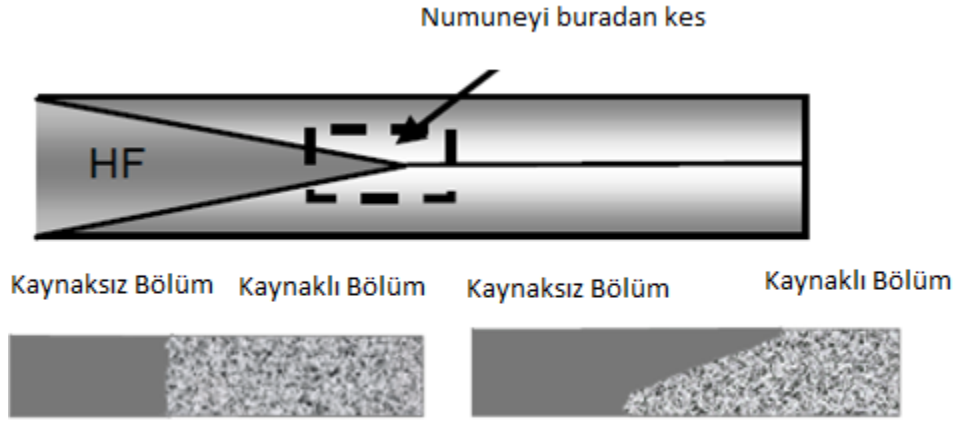
5. TEST VE MUAYENELER

5.1 Tahribatlı Muayeneler

Tahribatsız muayene yöntemlerindeki gelişmeler müşteriye giden hatalı ürün miktarında azalmayı önemli miktarda sağlamıştır. Ancak en iyi tahribatsız test bile hatalı ürünün müşteriye kaçmamasını garanti edemez. Çünkü tahribatsız test metodları belli bir hata payıyla çalışır. Tahribatlı testler ise genelde doğrulama olarak kullanılır. Tahribatlı testler tahribatsız olan testler gibi tüm boru üretimini doğrulayıcı yönde çalışmaz. Tahribatlı testler makine ayarları, çelik kalitesi ve kaynak hakkında geniş bilgi verir.

5.1.1 Enine kaynak alanı doğrulama metodu

Bu metod basit, hızlı olarak her ayar değişimini, bant kenarlarının birbirine göre paralel olup olmadıklarını doğrulamak için kullanılabilir (Şekil 5.1). Kesme torçu kaynak V'si bölgesini kesmek için kullanılır. Yarık kısım açılarak yarı kaynaklı ve kaynaklı bölüme bakılır. Kaynaklı kısım parlakken, kaynaklı kısım ısıdan kararmış olarak görünür. Eğer koyu ve açık renkli(kaynaklı ve kaynaklı) bölümler arası çizgi dikse, bant kenarlarının birleşmesi paralel ve düzgündür. Eğer bu çizgi eğimliyse, bant kenarları tepe yapacak şekilde bir araya gelmiştir. Tepe oluşturmuş şekilde birleşimler kalıntı hataları veya dışta soğuk kaynak risklerini oluşturur. Ayrıca tepe oluşumlu birleşimler paralel birleşime göre daha fazla kaynak gücü çeker ve iç yüzeyin normalden daha fazla ısınarak erimesi ve empedere zarar vermesine sebep olur. Bu tip bir hataya kılıçlı makara dizaynındaki hatalar veya bandın geri yaylanması sebep olabilir. Bu hatayı engellemek için kenar biçimlendirme önemlidir [20].

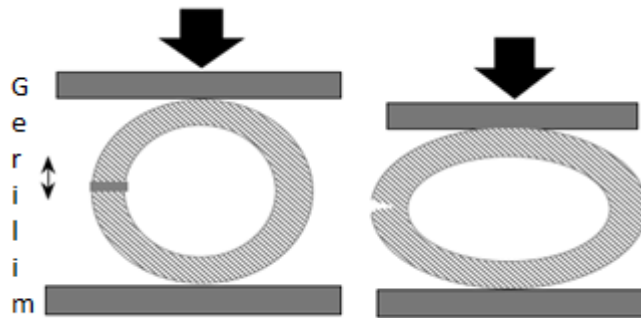


Şekil 5.1 : Enine kaynak slanı doğrulama metodu [20].

5.1.2 Yassıltma testi

Her yeni bant değişiminde yassıltma testi boru üretim sürecinde uygulanır. Tahribatsız testlerle tam olarak muayenenin yapılamadığında kaynak bölgesinin sünekliği hakkında iyi doğrulama yapan bir yöntemdir. Genelde ferrit bölgesindeki hataları gün yüzüne çıkaran bir test metodudur.

Yassıltma testi (Şekil 5.2) testin uygulama pozisyonu değiştirilerek iç ve dıştaki hatların görülmesini sağlar. Kesilen numune saat 12 yönünde kaynak çizgisi olacak şekilde yassıltıldığında borunun iç yüzeyi çekme dış yüzeyi basma gerilmesine maruz kalır; saat 3 yönünde kaynak çizgisi olacak şekilde yassıltıldığında gerilme tipleri tersinedir. Test numuneleri en az boru çap uzunluğundan 10 cm uzunluğuna kadar seçilir. Bu testi uygulamadan numune boru uçlarındaki kenar çapakları ve testere çapakları giderilmelidir [20].



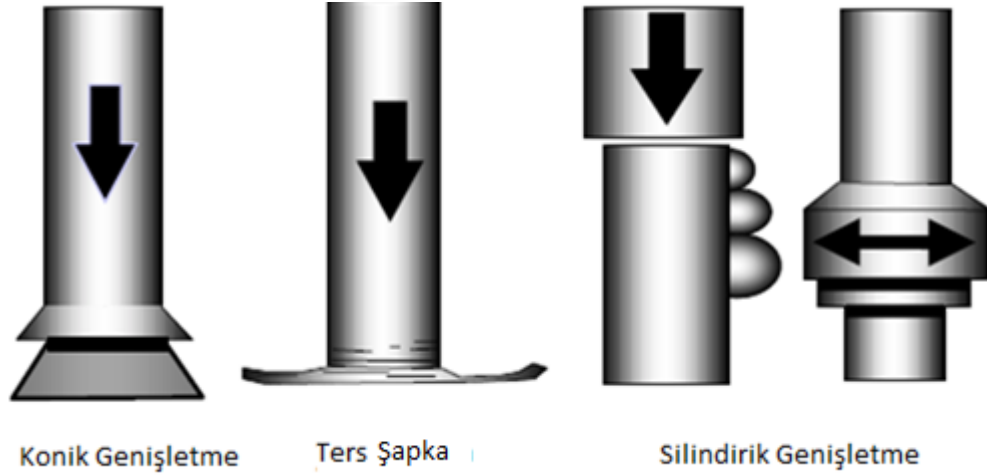
Şekil 5.2 : Yassıltma testi [20].

5.1.3 Genişletme testi

Bir diğer önemli test ve çok kullanılan test metodu genişletme testidir (şekil 5.3). Bir mandrel aracılığıyla numune borunun ucunun genişletilmesiyle uygulanır. Genelde borunun müşteride uygulanacağı işlem öncesi similasyon edilmesi anlamına gelse de uygulamada yaşanılan problemler nedeniyle limitleri vardır.

Bu yöntemde boru ucundaki ufak bir hata bu testin yanlış yorumlanmasını sağlar. Boru iç apağının derin alınması çentik etkisi oluşturacağından kaynak bölgesinden kaynağın amasına neden olacaktır. Bunun tersine boru iç çapağı kalın bırakılırsa aslında zayıf olan kaynağın kalın apaktan kazanılan dayanımla bu testten geçmesi ile hatalı karar verilmesini sağlar.

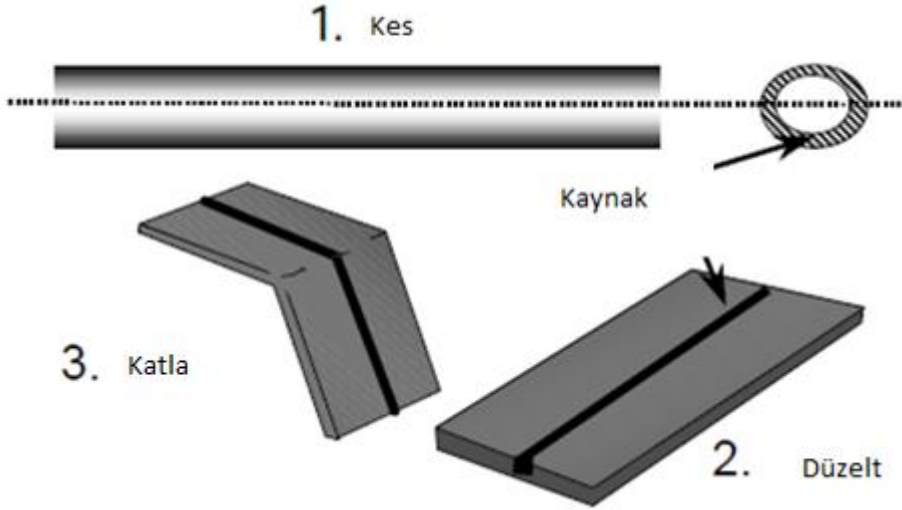
Bu test uygun bir şekilde yapılırsa bile akma dayanımına duyarlı olduğundan kaynak hatası olmadığı halde yumuşak olduğundan kaynaktan açma ya da hatalı olduğu halde kaynağın sert olduğundan bu testi geçmesi yüzünden hatalı karar verilmesi olasıdır [20].



şekil 5.3 : Genişletme testi [20].

5.1.4 Katlama testi

Genelde kullanılan katlama testi ters katlama testidir (şekil 5.4). Kısa parça boru numunesi kaynak dikişinden 90 derece olacak şekilde yarıılır. Kesit yassılıtır ve kaynağın iç kısmı dışa katlanacak şekilde katlanır. Bu yöntem i yüzey hatalarını görmek için iyi bir araçtır [20].



Şekil 5.4 : Katlama testi [20].

5.2 Tahribatsız Muayeneler

5.2.1 Girdap akımları testi

Eddy Current Testi olarak da geçen bu yöntemde elektromanyetizma kullanılmaktadır. Alternatif akım bakır tel gibi bir iletken üzerine uygulandığında bu iletken etrafında manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan alternatif akım etkisiyle değişir. Başka bir elektrik iletkenliği olan malzeme bu manyetik alanı değişimine yaklaşırsa bu iletken üzerinde elektrik akımı indüklenir. Girdap akımları dairesel yolda akan indüklenmiş elektrik akımları etrafında akar. Herhangi bir hata oluştuğunda bu girdap akımları bozulmaya uğrar. Bu test yönteminin çalışma prensibi Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Bu yöntemle çatlak tespiti, malzeme kalınlık ölçümü, malzeme kaplama ölçümü, iletkenlik ölçümü yapılabilir [21].

Test için Eddy akımlarını bir başlık kullanılır. Bu başlığın içinde elektriksel olarak iletken bir sargı vardır.

1



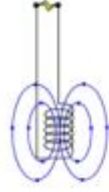
Alternatif akım test tipine göre seçilen frekanstaki sargıdan geçen akıma izin verir.

2



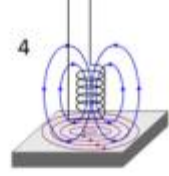
Alternatif akım bu sargıdan geçerken manyetik alan genişler ve daralır.

3



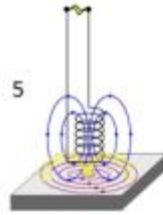
Elektriksel iletken malzeme sargının dinamik manyetik alanı içerisinde yer alırsa, indüksiyon meydana gelir ve eddy akımları malzeme üzerinde indüklenir.

4



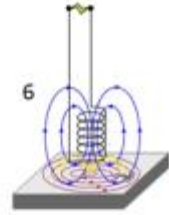
Malzeme içerisinde akan Eddy Akımları birincil manyetik alana zıt olacak şekilde kendi ikincil manyetik alanını üretir.

5



İletken malzemede hata ile karşılaşılınca eddy akımları kesintiye uğrar.

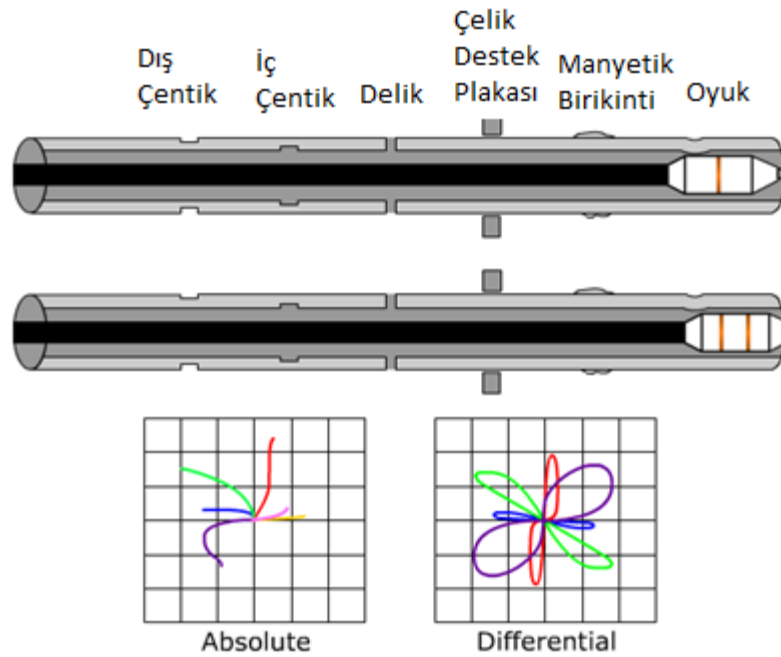
6



Bu tüm elektromanyetik indüksiyon prosesinin eddy akımlarını üretmesi test frekansına göre saniyede yüzlerce milyonlarca kez tekrarlanır.

Şekil 5.5 : Girdap akımlarının çalışma prensibi.

Hata tipine göre önceden numune ile ayarlanan ve bulunan sinyal tipleri bir monitör aracılığıyla ne hatası olduğu tespiti yapılabilmektedir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 : Girdap akımlarının hatayı göstermesi.

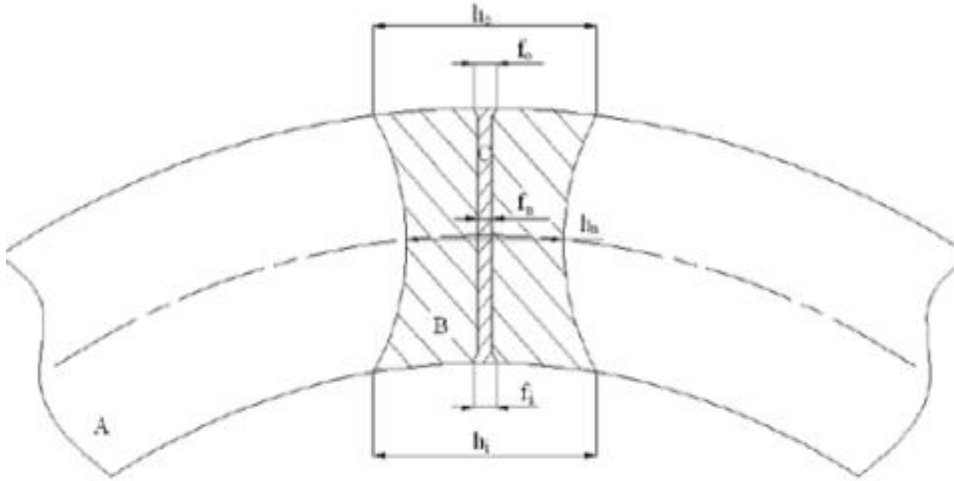
5.2.2 Işık mikroskobu ile metalografik muayene

Metalografi malzemelerin, alaşımların metallerin içindeki bileşenlerin belirlenmesi ve aralarındaki ilişkinin belirlendiği bilimsel bir disiplindir. Işık mikroskobu ile

metallerin incelenmesinde için kreitik faktör numune yüzeyinin yüzey hazırlama işlemidir. Henry Clifton Sorby tarafından ilk kez 1863 yılında numune yüzeyi parlatılıp dağlayarak inceleme gerçekleştirmiştir. Günümüzde Nital, Pikral çözeltileri dağlayıcı niteliğiyle demir çelik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 5.1’de yüksek frekans indüksiyon kaynağı kabul, kritik kabul ve red edilecek geometrik kontrol limitleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Yüksek frekans kaynağı metalografik muayene uygun geometrisi.

	Birleşme Bölgesi		ITAB		Metal Akış Açısı	
	f_n (mm)	$f_o \approx f_i$ (mm)	h_n (mm)	$h_o \approx h_i$ (mm)	α	$\Delta\alpha$
Kabul	0,02 - 0,14	$(1,3 - 3) f_n$	1-3	$(1,5 - 2,2) h_n$	50-80°	<10°
Kritik	0,01-0,02 0,14-0,17	$(3 - 5) f_n$			80-85°	10-15°
Ret	<0,01; >0,17	$\leq f_n$			>85°; <45°	$\geq 15^\circ$



5.2.3 Taramalı elektron mikroskobu ile metalografik inceleme

Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir.

Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir. Çizelge 5.2’de Işıl ve Elektron mikroskobu karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Işık mikroskobu – Elektron mikroskobu karşılaştırma.

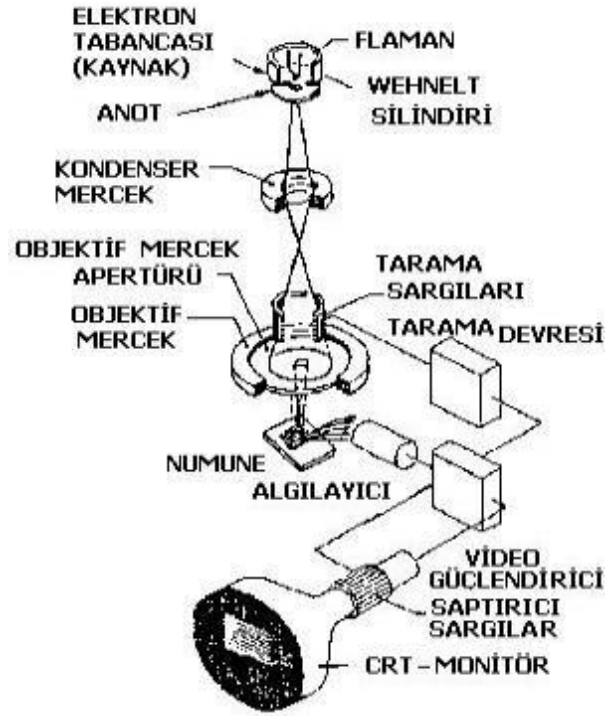
	Işık Mikroskobu	Elektron Mikroskobu
Aydınlatma Kaynağı	Görünür ışınlar ($\lambda = 550$ nm)	Elektron demeti ($\lambda = 0,005$ nm)
Çözünürlük	0,25 μm	0,05 μm
Max Büyütme	1400 X	300000X

5.2.3.1 Çalışma prensibi

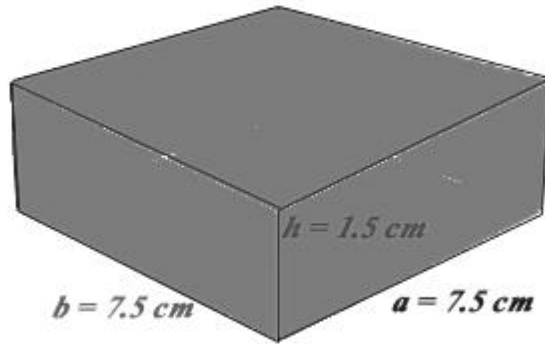
Taramalı Elektron Mikroskobu Optik Kolon, Numune Hücresi ve Görüntüleme Sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır (Şekil 5.3).

Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için kondenser mercekleri, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apatürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune 10^{-4} Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır.

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi Elektron mikroskobu görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışımaları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır [22].



Şekil 5.7 : Taramalı elektron mikroskopunun çalışma prensibi.



Şekil 5.8 : Taramalı elektron mikroskopunda incelenecek numunenin maksimum boyutları.

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi elektron mikroskopunda incelenecek numune boyutları sınırlanmıştır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Malzeme Seçimi

Çizelge 6.1 : İncelenen ürünün yapıldığı malzemelerin kimyasal değerleri.

	C	Si	Mn	P	S.	Al	Nb	Ti	V
Standart	0.10 maks.	0.50 maks.	1.00 maks.	0.025 maks.	0.025 maks.	0.015 min.	0.090 maks.	0.15 maks.	0.20 maks.
7132	0.06	0.015	0.55	0.012	0.006	0.047	0.032	0.002	0.19
H320	0.06	0.01	0.32	0.012	0.008	0.038	0.011	0.001	0.001

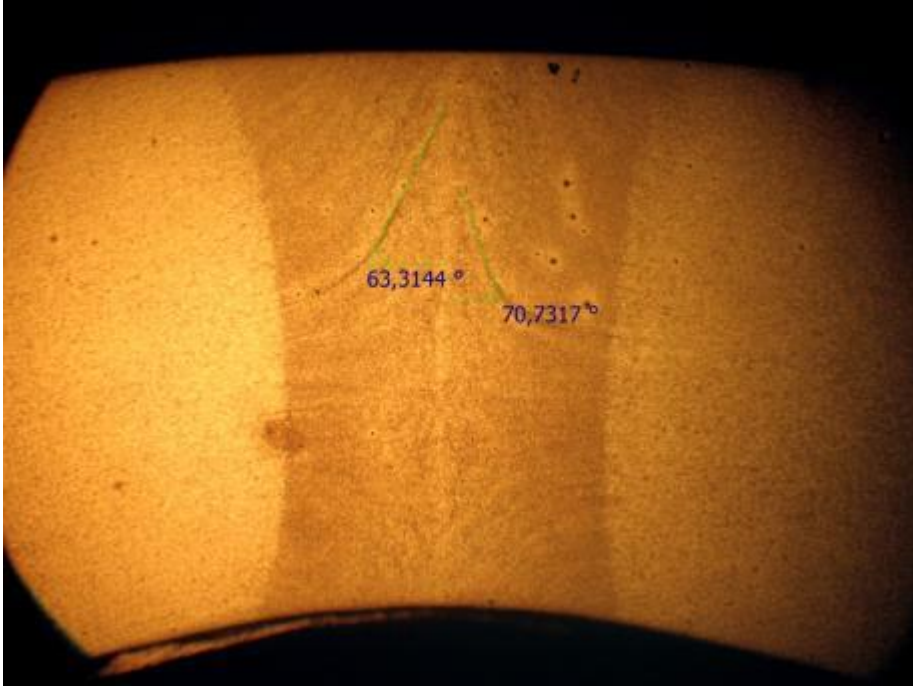
İncelenen üründe Çizelge 6.1’deki 7132 yoğunlukta olmak üzere H320 ile birlikte iki tip tedarikçiden sağlanan malzeme ile boru yapılmaktadır. 7132 kodlu malzemenin Mn değeri ve mikro eklentilerinin miktarı daha fazladır. Ayrıca 7132 kodlu malzemede daha sık segregasyona rastlanmaktadır.

Deneyde kullanılacak malzemenin segregasyon hatası içermeyecek şekilde olması tercih edilmiştir ve segregasyon bulunması durumunda yapılabilecekler konusunda araştırma yapılmıştır.

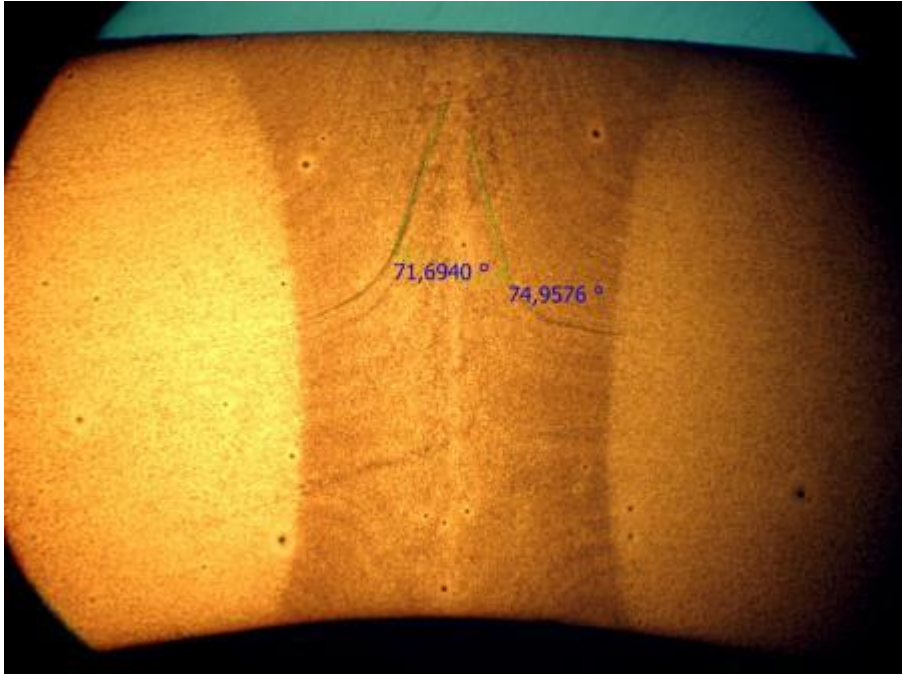
Malzeme ve kaynak bölgesi incelemeleri % 5’lik nital çözeltisi ile 10 saniye süre ile yapılmıştır. Ayrıca kaynak hatası bulunan 7132 kodlu malzemeli ve H320 kalitesindeki borular elektron mikroskopunda incelenmiştir.

6.2 Bant Genişliği Seçimi

Segregasyonun görüldüğü durumda yapılabilecek faaliyetlerden biri de ITAB bölgesinde oluşan akış çizgilerini yataya daha paralel hale getirmektir. Bunun için 25x2.5 4936 EDC kodlu H360 kalite boru üretiminde yapılan denemelerde: 77 mm bant genişliğinde dilinmiş bant ile yapılan borularda ITAB bölgesindeki akış çizgilerinin yatay ile yaptığı açı 63.144 ve 70.7317 iken; 78 mm bant genişliğinde 71.6940 ve 74.9476 olduğu ölçülmüştür. Yani bant genişliğini 1 mm azaltmak 4 ile 7 derece arasında akış çizgilerinin yataya yaklaşmasını sağlamaktadır.



Şekil 6.1 : Bant genişliği 77 mm olarak imal edilen 25x2.5 imalatı.

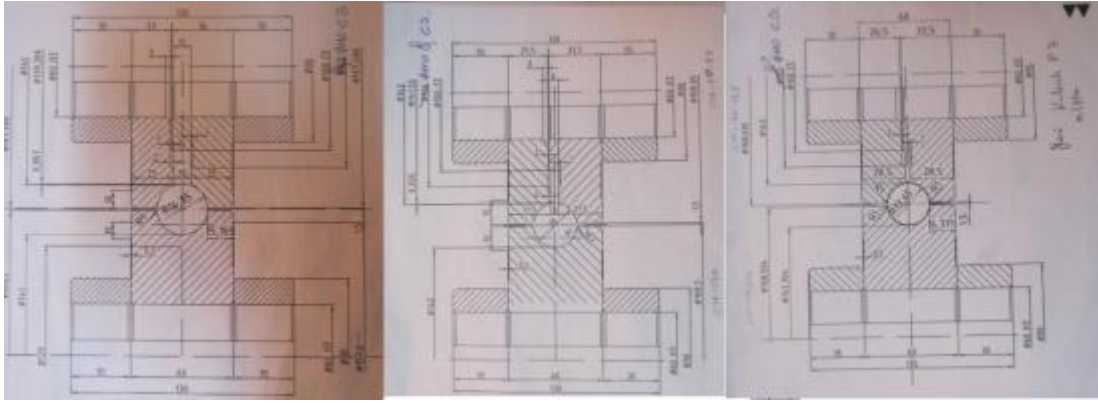


Şekil 6.2 : Bant genişliği 78 mm olarak imal edilen 25x2.5 imalatı.

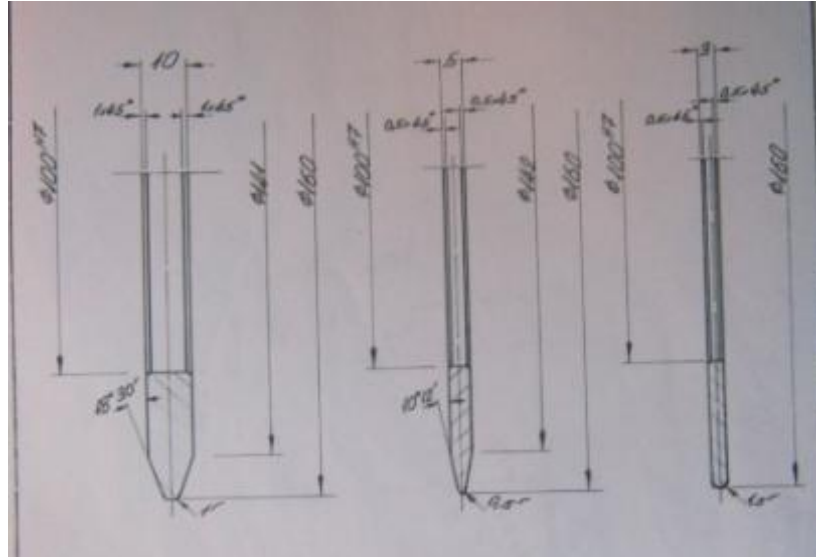
H320LA Borçelik Menşei malzemenin segregasyon içermediği bilindiğinden deneysel çalışmada bant genişliği olması gereken 79 mm olarak dilinmiş ve kullanılmıştır.

6.3 Deneysel Çalışmalardaki Kaynak Kritik Faktörleri

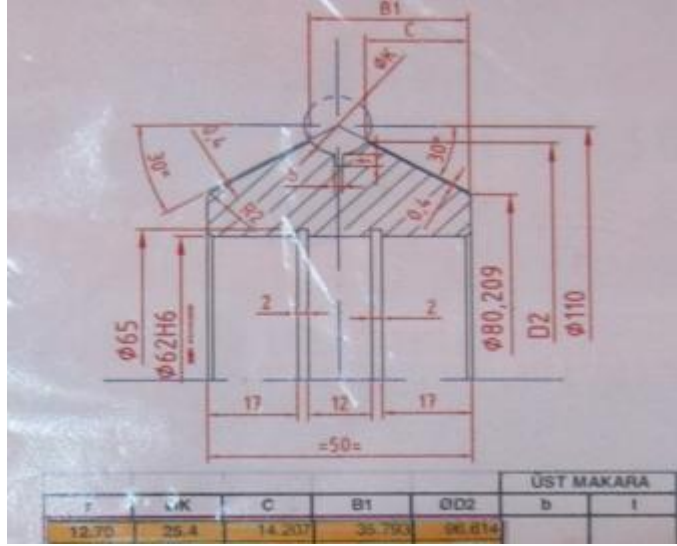
Yüksek Frekans kaynak performansını etkileyen temel 3 parametre vardır. Bunlar kaynağın frekansı, çalışılan güç ve hat hızıdır. Bu 3 parametreye ek olarak ikincil parametreler kaynak jeneratöründen boruya aktarılan kaynakaltı makaralarının baskısı ve kılıçlı dikey makaralar arası mesafe miktarıdır. Kaynak gücü ve hızı ile birlikte Şekil 6.3 ve 6.4’de görülen kılıçlı makaraların kılıçlı dikey makaralar arası mesafesi ve Şekil 6.5’de görülen kaynakaltı makara çıkışındaki boru çapı kritik parametreler olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.3 : Deneyde kullanılan kılıçlı makara seti teknik resimleri.



Şekil 6.4 : Deneyde kullanılan kılıçlı makara seti kılıçları.



Şekil 6.5 : Kaynakaltı 3'lü makara seti teknik resmi.

Deney tasarımı için voltaj ve amper faktörleri birbirine bağlı ve güç değerini oluşturacak şekilde; kaynakaltı çapı, hız ve kılıçlı gap'leri bu değerlerden bağımsız, frekans ise güç ve hız değerlerine bağlıdır.

Makine panelindeki akım, voltaj, frekans değerlerinin sisteme kaydedilen ile aynı olması sağlandıktan sonra alınan ölçümlerde;

$$\text{Voltaj} \times \text{Amper} \times 0,83 = \text{Kaynak Gücü} \quad (6.2)$$

Bu değerler Çizelge 6.2'de görülebilir.

Çizelge 6.2 : Deney tasarım alt ve üst noktaları.

	Kılıçlı Gapleri [mm]	Güç [kWatt]	Kaynakaltı Çapı [mm]	Hız [m/dk]
Alt Nokta	1.2	46	25.8	50
Üst Nokta	1.8	60	26.4	35

6.3.1 Kaynak hızı ve güç ilişkisi

Sağlam ve kaliteli 25x1.5 mm H320 iççapaksız imalatı deneme öncesi kılıçlı gapleri 1.4 mm, kaynakaltı çapı 25.8 mm, kaynak hızı 42 m/dk, kaynak gücü 48 kW olarak üretim yapılmıştır.

Uygun maksimum ve minimum Kaynak hızı-Güç uyumunu bulmak için kılıçlı gapleri 1.4 mm, kaynakaltı çapı 25.8 mm olan ideal ayar üzerinde şekildeki gibi 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 m/dk hızlara uyumlu güç arttırımı yapılmıştır (Çizelge 6.3). Bu hız ve güçteki borulardan numune alınıp saat 12 ve 3 yönünde yassılma testleri ile

birlikte 3'er adet her numuneden konik genişletme testi yapılmış ve herhangi bir problem ile karşılaşılmamıştır (Çizelge 6.4).

Çizelge 6.3 : Farklı hız değerlerinde diğer parametrelerin değişimi.

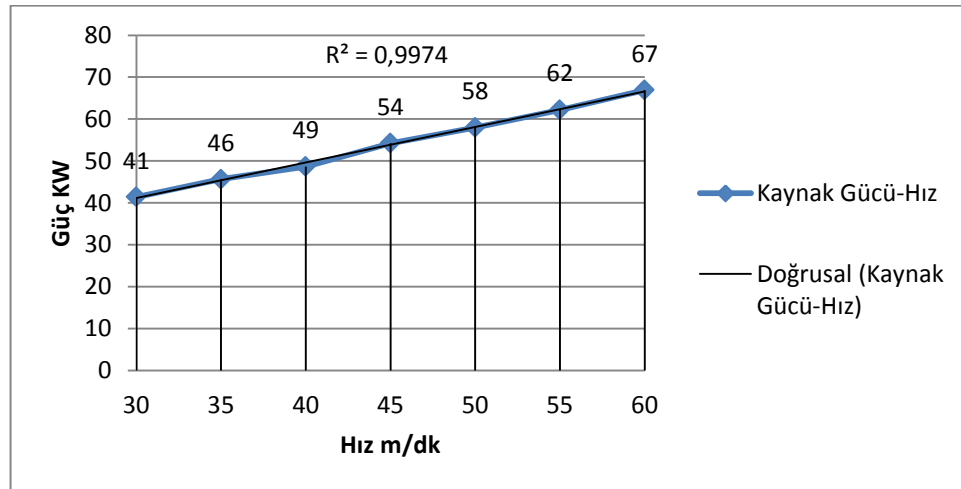
Deney	Hız [m/dk]	Frekans [kHz]	Akım [Amper]	Gerilim [Volt]	Güç [kWatt]
1	30	392	98	509	41
2	35	392	103	534	46
3	40	392	107	548	49
4	45	392	114	573	54
5	50	393	118	592	58
6	55	393	123	609	62
7	60	393	128	630	67

Çizelge 6.4 : Farklı hız değerlerinde yapılan deneylerin tahribatlı test sonuçları.

Deney	Hız [m/dk]	Güç [kWatt]	Saat 12 yönünde yassılma	Saat3 yönünde yassılma	Konik genişletme
1	30	41	Kabul	Kabul	3/3
2	35	46	Kabul	Kabul	3/3
3	40	49	Kabul	Kabul	3/3
4	45	54	Kabul	Kabul	3/3
5	50	58	Kabul	Kabul	3/3
6	55	62	Kabul	Kabul	3/3
7	60	67	Kabul	Kabul	3/3

Konik Genişletme 3'er numuneden yapılmıştır.

Buna göre Şekil 6.6'daki grafik elde edilmiştir.



Şekil 6.6 : Denemenin yapıldığı makinedeki 25x1.5 imalatı için Hız-Güç eğrisi.

$$\frac{67 - 41}{60 - 30}(x - 30) = y - 41 \quad (6.3)$$

$$13x + 225 = 15y$$

(6.3) denklemini bulunur.

Bu makinedeki 25x1.5 H320 malzemeli boru imalatı için Kaynak hızı-Güç eğrisi şekildeki gibi olması gerektiği bulunur. Buradaki kısıt iç çapaksız boru üretiminde iç çapak kalitesi sebebiyle çok yüksek hızlara çıkılamamasıdır.

6.4 Kritik Faktörleri Göre Yapılan Deney Tasarımı

Kılıçlı Gapleri, kaynak gücü, kaynakaltı çapı ve hız faktörleri ile deney tasarımı yapılmıştır. Minitab programı kullanılarak belirgin etkisi olan faktörler ve faktörler arası ilişki bulunmuştur. Faktörleri kıyaslamak için dayanım kaynak dikine ve boyuna her numuneden yapılan çekme test sonuçlarının ortalamaları alınarak hesaplanmıştır.

Dayanım

$$= \frac{(\text{kaynak pozisyonu boyuna } \sigma_{\text{çekme}} + \text{kaynak pozisyonu dikine } \sigma_{\text{çekme}})}{2}$$

Etkisi yüksek olan faktörlerin regresyon analizi yapılarak dayanımı verecek denklem tanımlanmıştır. Yapılacak deney tasarımı çalışması için Çizelge 6.5'deki plan oluşturulmuştur.

Çizelge 6.5 : Deney tasarım tablosu.

Deney	Kılıçlı Gapleri [mm]	Güç [kWatt]	Kaynakaltı Çapı [mm]	Hız [m/dk]
1	1.8	46	26.4	50
2	1.8	60	26.4	35
3	1.8	60	26.4	50
4	1.8	46	26.4	35
5	1.2	46	26.4	35
6	1.2	60	26.4	35
7	1.2	60	26.4	50
8	1.2	46	26.4	50
9	1.8	46	25.8	50
10	1.8	46	25.8	35
11	1.8	60	25.8	50
12	1.8	60	25.8	35
13	1.2	60	25.8	35
14	1.2	60	25.8	50
15	1.2	46	25.8	50
16	1.2	46	25.8	35

6.5 Deneysel Çalışmalardaki Test ve Muayeneler

6.5.1 Çekme testi



Şekil 6.7 : Numune hazırlama sürecinden bir görüntü.

Çekme testi deneyde toplanan 13 boy numuneden ve bu numunelerin kaynaksız bölümünden alınan parçalardan kaynak pozisyonu çekme yönüne dik ve paralel olacak şekilde 2 farklı ebatta toplam 28 adet çekme test numunesi hazırlanmıştır. Şekil 6.7’de görüldüğü gibi boru kaynak dikişi karşısından tek taraflı kesilip önce

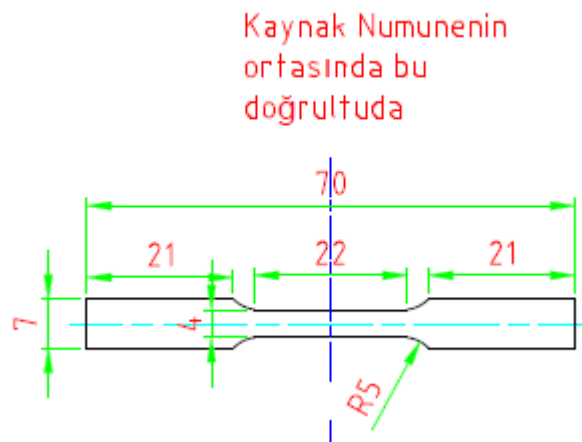
Çekiçle sonrasında presle ezilerek tekrar sac haline getirilmiş ve tornada ASTM E8 standardındaki ölçüler baz alınarak çekme test numunesi haline getirilmiştir.

Deneyler Shimadzu marka 50 kN yük kapasitesinde şekil 6.8'deki cihaz ile gerçekleştirilmiştir.



şekil 6.8 : Çekme testinde kullanılan çekme test cihazı.

şekil 6.9'da kaynak pozisyonu çekme yönü dikine çekme numune ölçüleri ve şekil 6.10'de bu resme göre hazırlanan çekme test numuneleri görülmektedir.

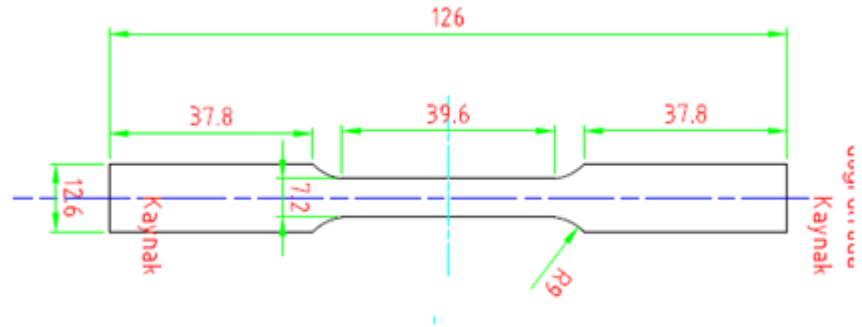


şekil 6.9 : ASTM E8 'e göre Kaynak pozisyonu çekme yönüne dik olacak şekilde alınan numune lleri.



Şekil 6.10 : ASTM E8 'e göre kaynak pozisyonu çekme yönüne dik olacak şekilde alınan numuneler.

Şekil 6.11'de kaynak pozisyonu çekme yönünde çekme numune ölçüleri ve Şekil 6.12'de bu resme göre hazırlanan çekme test numuneleri görülmektedir.



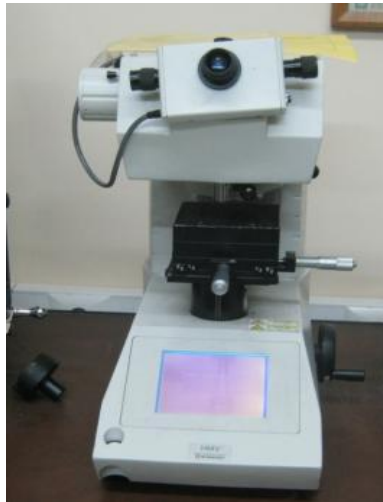
Şekil 6.11 : ASTM E8 'e göre kaynak pozisyonu çekme yönünde olacak şekilde alınan numune ölçüleri.



Şekil 6.12 : ASTM E8 ‘e göre kaynak pozisyonu çekme yönünde olacak şekilde alınan numuneler.

6.5.2 Mikro sertlik testi

Sertlik testi alınan numunelerden tahribatlı test sonrası sağlam ve hatalı olan borulardan kaynak bölgesi boyunca yapılmıştır. Şekil 6.13’deki Shimadzu Vickers Mikro sertlik cihazı ile 1,961 N (HV0,1) uygulanarak gerçekleştirilmiştir. 2 numuneden 13 noktadan ölçüm yapılmıştır.



Şekil 6.13 : Deneydeki numunelerin kaynak bölgesinin sertlik ölçümünde kullanılan mikro sertlik cihazı.

6.5.3 Metalografik muayene

Farklı kritik faktörler ile üretilen borularda kaynak dikiş geometrisini görme amaçlı yaklaşık 3 cm uzunluğunda borular kesilmiştir. Kesilen 13 numune kaynak dikiş geometrisini ve yapısını görmek için Sırasıyla 200 ve 1000’lik zımparalar ile zımparalanıp % 5 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır. 50 optik 7 dijital zoom ile makro görüntüleri alınmış ve yapılan incelemeler ile kaynak bölgesi genişlikleri belirlenip teorik değerler ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

6.5.4 Yassılma testi

Yassılma Testi EN10305 boru teslim koşullarında belirtildiği gibi EN10233 standardına göre boru presle ezilen tarafı H yüksekliğine inene kadar 6.4 denklemindeki gibi uygulandığında kaynak bölgesinde herhangi bir olumsuzluğa rastlanmamalıdır. Şekil 6.14’da testin yapılışı gösterilmektedir.

$$H = \frac{(1 + C) \times T}{C + \frac{T}{D}} \quad (6.4)$$

H : Yük altındaki bölümdeki ezilen borunun mesafesi [mm]

D : Borunun dış çapı [mm]

T : Borunun et kalınlığı [mm]

C : Çelik kalitesine göre değişen bir sabit 0.10-0.07 arası



Şekil 6.14 : Yassılma testi

6.5.5 Genişletme testi

Yassılma Testi EN10305 boru teslim koşullarında belirtildiği gibi EN10234 standardına göre 60 dereceli konik mandrel ile preste çelik kaltesi ve et kalınlığına göre % olarak dayanması gereken son çapa kadar şişirilerek yapılır. Şekil 6.15’de testin yapılışı gösterilmektedir.



Şekil 6.15 : Genişletme testi.

6.5.6 Kripling testi

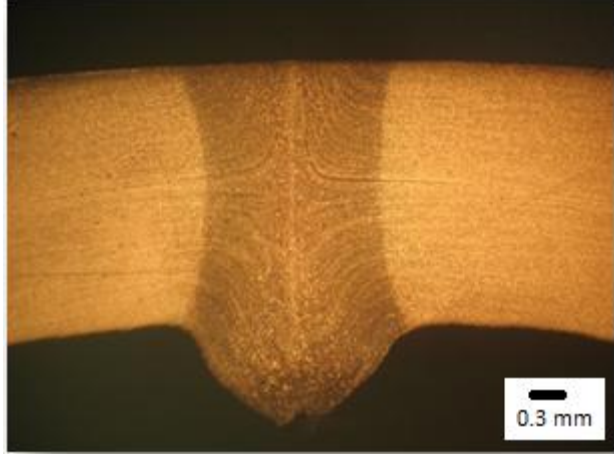
Kripling Testi müşteri prosesini simule etme amacıyla 1 cm uzunluğunda kesilen borudan 60 bar basınçta hidrolik pres yardımıyla 4 cm/s hız ile deney yapıldığında daha çok segregasyondan kaynaklanan kaynak hatasını ortaya çıkartacak formun oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 6.16'de testin yapılışı gösterilmektedir.



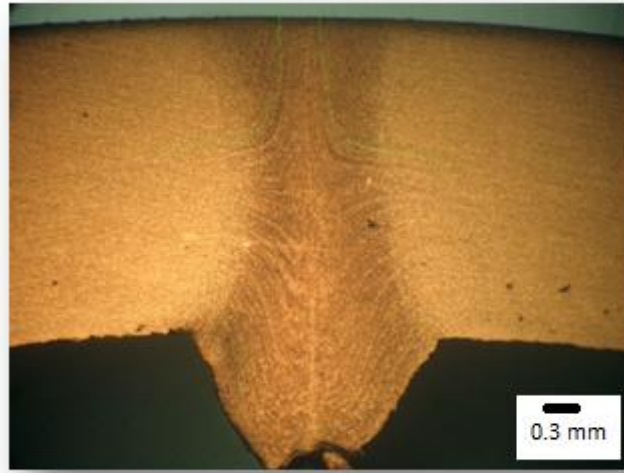
Şekil 6.16 : Kripling testi.

7. DENEY SONUÇLARI VE YORUMLAR

7.1 Malzeme Seçimi

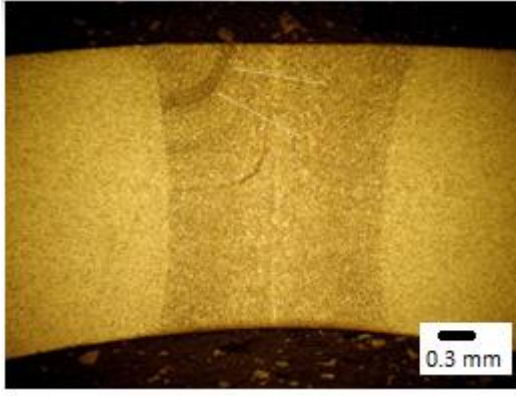


Şekil 7.1 : Segregasyonun boru kaynağında Isı Tesiri Altındaki Bölgede görüntüsü.

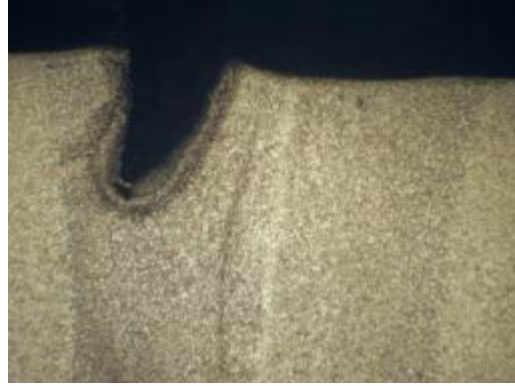


Şekil 7.2 : Segregasyonun boru kaynağında Isı Tesiri Altındaki Bölgede boru yüzeyine çıkması durumu.

Segregasyonun boru kaynağında Isı Tesiri Altındaki Bölgede boru yüzeyine çıkması halinde Şekil 7.2'deki gibi boruya yapılacak yassıltma genişletme benzeri işlemlerde yarıлма riskinin arttığı bilinmektedir.



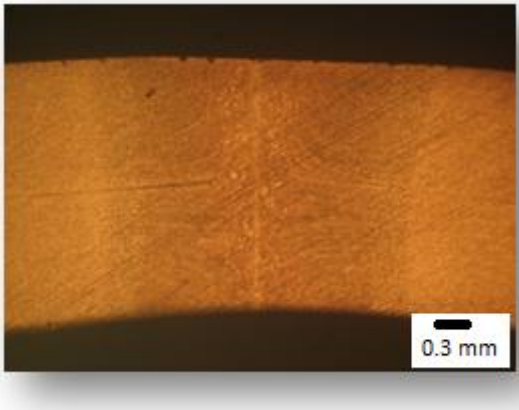
(a)



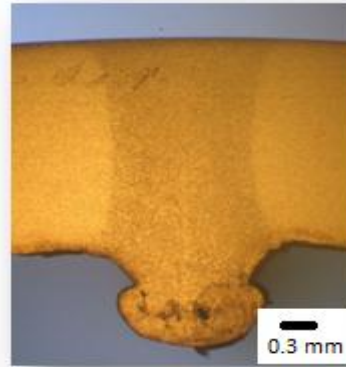
(b)

Şekil 7.3 : (a), (b) Araç koltuğu karkas üreticisinin kripling işlemi sonucunda kaynak bölgesinde hasarın meydana geldiği borunun ITAB bölgesindeki segregasyon.

Erdemir Menşei 7132 kodlu H320LA kalite bantlarda akış çizgileri ve segregasyon daha yoğun bir şekilde gözlenmektedir. Borçelik Menşei H320LA bantlarda kaynak bölgesinde akış çizgilerinin belirginleşmediği ve segregasyon çizgisi oluşma sıklığının daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.4).



(a)

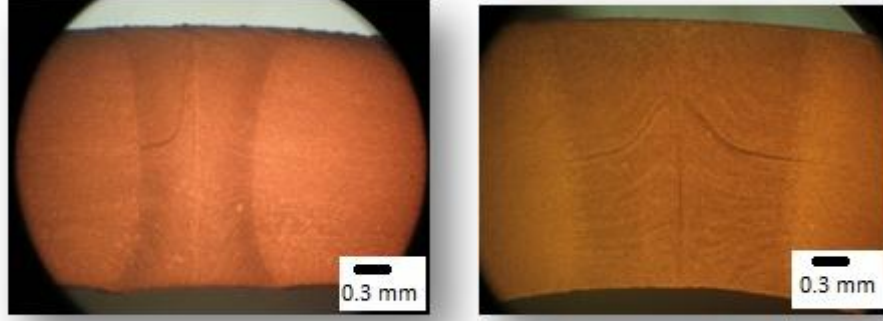


(b)

Şekil 7.4 : ITAB bölgeleri (a) 7132 kodlu EDC bandından yapılan borunun, (b) H320LA Borçelik bandından yapılan borunun metalografik muayeneleri.

Şekil 7.5’de görüldüğü gibi segregasyonun görüldüğü durumlarda eğer segregasyon çizgisi bandın et kalınlığının ortasında yer alıyorsa makine ayarları ile oynayıp bu çizginin dışarı çıkması engellenmesi bir miktar kaynak zayıflığı riskini azaltmaktadır. Ancak bu şekilde makine ayarındaki müdahale farklı riskler de doğurmaktadır.

7132 kodlu malzemede karşılaşılan diğer bir problem ise MnS segregasyonunun bulunmasıdır. MnS segregasyonu sebebiyle oluşan iç gerilmeler, kaynak bölgesi deformasyonu sırasında o bölgede çatlaklara yol açmaktadır. (Ek A)



Şekil 7.5 : Segregasyon çizgisinin eksene doğru alınmış durumu.

Şekil 7.5'te görüldüğü gibi aynı üretimde makine ayarlarına müdahale sonucunda solda ITAB bölgesi şekli olarak daha uygun bir şekil yerine segregasyon çizgisinin dışarı çıkmasını engellemek için yukarıya doğru ITAB bölgesinin genişlediği bir ITAB formu tercih edilmektedir. Bu şekilde de boru nötr eksenine göre simetriği bozulacağından kaynak zafiyet riski daha düşük olsa da yine vardır.

Deney çalışması Çizelge 7.1 ve 7.2'de kimyasal ve mekanik özellikler gösterilen H320LA kalite soğuk şekillendirmeye uygun yüksek akma mukavemetli soğuk haddelenmiş çelik kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 7.1 : Deneyde kullanılan malzemenin kimyasal değerleri.

H320LA	C	Si	Mn	P	S.	Al	Nb	Ti	V
Standart	0.10 maks.	0.50 maks.	1.00 maks.	0.025 maks.	0.025 maks.	0.015 min.	0.090 maks.	0.15 maks.	0.20 maks.
Bulunan	0.06	0.01	0.32	0.012	0.008	0.038	0.011	0.001	0.001

Nb+Ti+V+B ≤ % 0.22

Çizelge 7.2 : Deneyde kullanılan malzemenin mekanik değerleri.

H320LA	Çekme Dayanımı MPa.	Akma Dayanımı MPa.	Kopma Uzaması %
Standart	400 min.	320/410	22 min.
Bulunan	410	338	23

Daha önce bahsedilen Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı çelikler için Itoh ve Bessyo tarafından geliştirilen kaynak çatlak parametresine (6.4) göre;

$$P_{cm} = C + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (7.1)$$

Kabul edilebilir değer ön ısıtmasız kaynak bölgeleri için $P_{cm} < 0.4$ 'tür.

Çizelge 7.3 : Deneyde kullanılan malzemenin P_{cm} değeri hesabı için kimyasal değerleri.

H320LA	C	Mn	Cu	Cr	Si	Ni	Mo	V	B
Bulunan	0.06	0.32	0.038	0.023	0.01	0.018	0.001	0.001	0.001

$$P_{cm} = 0.06 + \frac{0.32 + 0.038 + 0.023}{20} + \frac{0.01}{30} + \frac{0.018}{60} + \frac{0.001}{15} + \frac{0.001}{10} + 5 \times 0.001$$
$$= 0.13385$$

Bulunan P_{cm} değeri 0.4 değerinin altındadır ve çalışılabilir bölümdedir.

7.1.1 H320 malzemesi incelemesi

H320 malzemesi tedarikçisi kendi hammaddelerini rulo sac olarak 5 farklı menşeyden sağlamaktadır. H320 malzemesinde görülen Ti, Nb çökeltilerinin kaynak sonrası kaynak bölgesinde 2 ile 5 mikron arasında büyüklükte bulunduğu görülmüştür. Büyük Ti, Nb çökeltilerinin kaynak bölgesinde çentik etkisi oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca kaynak bölgesinde tane yapısının küçük olduğu şerit halinde bölgeler tespit edilmiştir (Ek B). Kaynak bölgesinin kripling ya da yıldız boğma işlemlerinde çatladığı gözlenmiştir. Malzemenin içeriğinde homojen olarak dağılmamış mikro eklenti olarak Ti, Nb tanelerinin bulunduğu ve kaynak bölgesinde bir miktar daha büyüdüğü düşünülmektedir.

7.2 Çekme Testi Sonuçları

Deneyde Kullanılan malzeme olan H320LA kalite malzemenin boru olmadan önceki halde başka bir çekme test makinesinde, akma, çekme, kopma uzaması değerleri Çizelge 7.4'deki ve çekme-uzama grafiği Şekil 7.6'daki gibi bulunmuştur. Deney sonrası alınan ve çekme test için hazırlanan numune boyutlarının küçük olması ve bu test cihazında çekime uygun olmamasından dolayı Shimadzu 50 kN cihaz kullanılarak akma, çekme ve uzama değerlerine bakılmıştır. Çizelge 7.4'deki gibi çekme ve akma değerlerinin boru olmamış malzemeye göre bir miktar düşük çıkması ve birim şekil değişimi %' sinin yükselmesi kullanılan çekme test cihaz farklı olması veya alınan çekme test numunesi borunun kaynaksız bölümünün kaynağa yakın bölgesinden seçilmesi sebebiyle olabilir.

Çizelge 7.4 : Deneyde kullanılan malzemenin mekanik değerleri.

H320LA	Çekme Dayanımı MPa.	Akma Dayanımı Mpa	Kopma Uzaması %
Standart	400 min.	320/410	22 min.
Bulunan	410	338	23



Şekil 7.6 : Borunun kaynak olmamış bölümünden alınan parçadan yapılan çekme testi.



Şekil 7.7 : Kaynak pozisyonu çekme yönüne dik çekme testi yapılmış numuneler.

Çizelge 7.5 : Kaynak pozisyonu çekme yönüne dik çekme test sonucu mekanik değerleri.

Deney	Kılıçlı Gapleri [mm]	Güç (Fiili) [KWatt]	Kaynakaltı Çapı [mm]	Hız [m/dk]	Akma dayanımı [MPa]	Çekme dayanımı [MPa]	Kopma Uzaması %
1	1.8	48	26.4	50	0	0	0
2	1.8	51	26.4	35	385	407	16.5
3	1.8	60	26.4	50	385	401	16
4	1.8	44	26.4	35	385	404	16
5	1.2	45	26.4	35	385	409	14.2
6	1.2	49	26.4	35	385	405	17.1
7	1.2	60	26.4	50	385	409	18.5
8	1.2	46	26.4	50	0	0	0
9	1.8	0	25.8	50	0	0	0
10	1.8	46	25.8	35	385	389	19.4
11	1.8	62	25.8	50	385	406	17.8
12	1.8	54	25.8	35	385	409	19.8
13	1.2	49	25.8	35	385	412	14.8
14	1.2	59	25.8	50	385	412	14.8
15	1.2	0	25.8	50	0	0	0
16	1.2	45	25.8	35	385	408	18.2

Çizelge 7.5'deki kaynak pozisyonu çekme yönüne dik numunelerin çekme test sonuçları incelendiğinde ortalama akma dayanımı 385 MPa, çekme dayanımı 406

Mpa ve kopma uzaması % 17 olduğu gör÷lmektedir. Kaynak içermeyen malzeme bölümüne göre akma dayanımı % 10 artmakta; çekme dayanımı % 6 artmakta; % Uzama değeri % 37 azalmaktadır.

Çekme testinde Şekil 7.7’de gör÷ldüğü gibi tüm numuneler malzeme bölgesinden kopmuştur.



Şekil 7.8 : Kaynak pozisyonu çekme yönünde çekme testi yapılmış numuneler.

Çizelge 7.6 : Kaynak pozisyonu çekme yönünde çekme test sonucu mekanik değerleri.

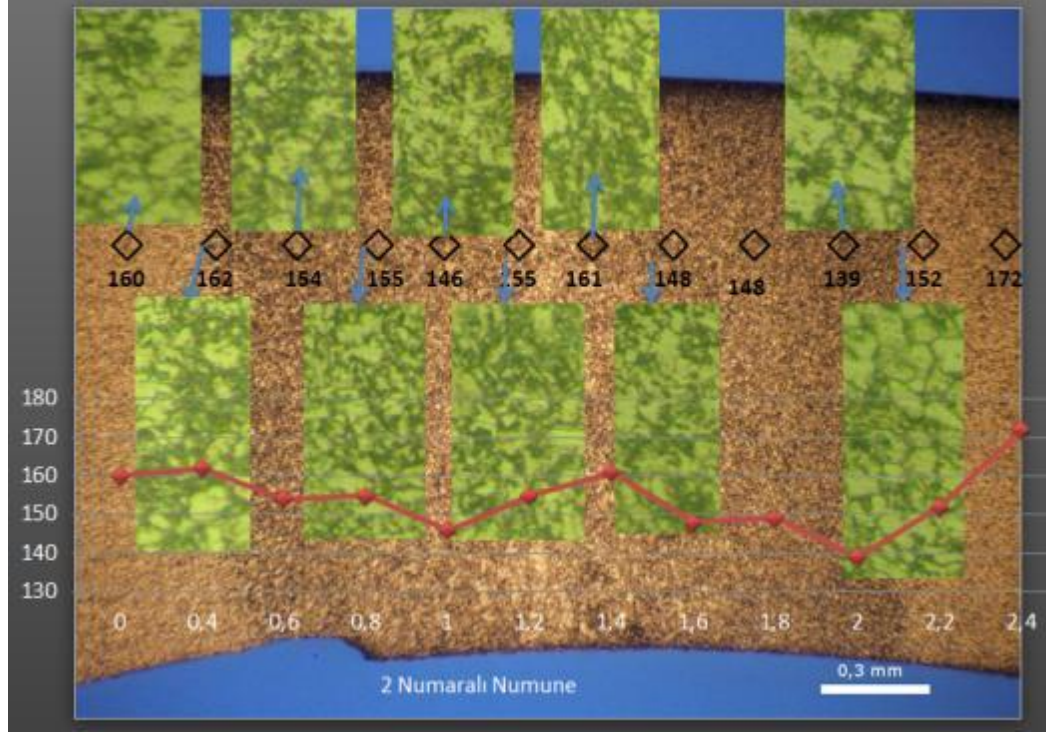
Deney	Kılıçlı Gapleri [mm]	Güç(Fiili) [kWatt]	Kaynakaltı Çapı [mm]	Hız [m/dk]	Akma dayanımı [MPa]	Çekme dayanımı [MPa]	Kopma Uzaması %
1	1.8	48	26.4	50	0	0	0
2	1.8	51	26.4	35	450	470	7
3	1.8	60	26.4	50	430	440	5.5
4	1.8	44	26.4	35	430	453	7.3
5	1.2	45	26.4	35	430	463	6
6	1.2	49	26.4	35	386	436	7.3
7	1.2	60	26.4	50	430	452	7.3
8	1.2	46	26.4	50	0	0	0
9	1.8	0	25.8	50	0	0	0
10	1.8	46	25.8	35	430	463	8.5
11	1.8	62	25.8	50	430	453	6.3
12	1.8	54	25.8	35	430	456	8
13	1.2	49	25.8	35	430	464	8
14	1.2	59	25.8	50	430	464	8
15	1.2	0	25.8	50	0	0	0
16	1.2	45	25.8	35	430	464	6.7

Çizelge 7.6'daki kaynak pozisyonu çekme yönündeki numunelerin çekme test sonuçları incelendiğinde ortalama akma dayanımı 420 MPa, çekme dayanımı 456 Mpa ve kopma uzaması % 7,5 olduğu görülmektedir. Kaynak içermeyen malzeme bölümüne göre akma dayanımı % 20 artmakta; çekme dayanımı % 19 artmakta; % Uzama değeri % 72 azalmaktadır.

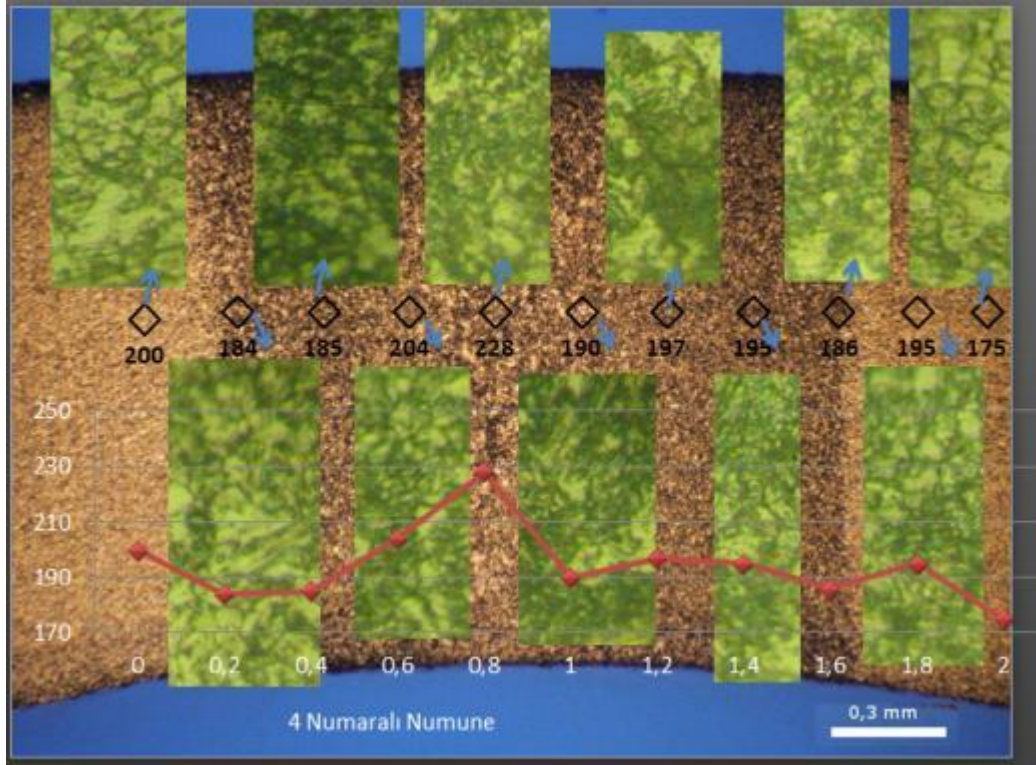
Kaynak sürecinde kaynak bölgesinin ısıtılıp hızlı soğutulması sebepli malzemeye göre daha dayanıklı fakat az sünek yapısı olduğu düşünülmektedir. Şekil 7.8'deki gibi kopan numuneler kaynak bölgesi boyunca çekildiklerinden kaynak bölgesi mekanik özelliklerine yakın sonuçların ortaya çıktığı düşünülmektedir.

7.3 Sertlik Testi Sonuçları

Kaynak bölgesi sertliği, kaynak geometrisi iyi olan ve tahribatlı testleri geçen 2 numaralı numune ile kaynak geometrisi uygun olmayan ve tahribatlı testlerden saat 3 yönünde yassılma testini geçemeyen 4 numaralı numunelerin sertlik ölçümleri Şekil 7.9 ve 7.10'daki gibi alınmıştır.



Şekil 7.9 : 2 numaralı numunenin kaynak bölgesi sertliği ve mikro yapısı.



Şekil 7.10 : 4 numaralı numunenin kaynak bölgesi sertliği ve mikro yapısı.

4 numaralı numunenin 2 numaralı numuneye göre kaynak bölgesi sertliğinin daha yüksek olduğu Şekil 7.9 ve 7.10 karşılaştırıldığında görülebilmektedir. Sağlam ve ITAB geometrisi uygun olan 2 numaralı numune ile tahribatlı testleri ve kripling

testini geçemeyen numune karşılaştırıldığında kaynak bölgesindeki sertlik değeri 4 numaralı numunede 195 vickers, 2 numaralı numunede 152.5 vickers olduğu görülmüştür. Ayrıca 4 numaralı numunede kaynak bölgesinde ferrit çizgisinin tek tarafında sertliğin fazla miktarda yükseldiği görülmüştür. Buna sebep ayarların aynı olduğu durumda güç değerinin % 13 daha düşük olarak çalışılmasının kaynak bölgesinin yeterli ısıtmadığı ve kaynak bölgesi içerisindeki inklüzyonların tam atılamaması olduğu düşünülmektedir.

Daha sert kaynak bölgesine sahip 4 numaralı numunenin tahribatlı testlerden kripling testini ve saat 3 yönünde yassılma testini geçememesinin sebebinin artan dayanıma karşın sünekliğin azalması olabileceği düşünülmektedir.

İki numunenin tane boyutları kaynak bölgesinde ve malzeme bölümünde incelendiğinde belirgin farklar görülememiştir. Her iki numunede de kaynak bölgesinde tane boyutları bir miktar küçülmüştür.

7.4 Yassılma Testi Sonuçları

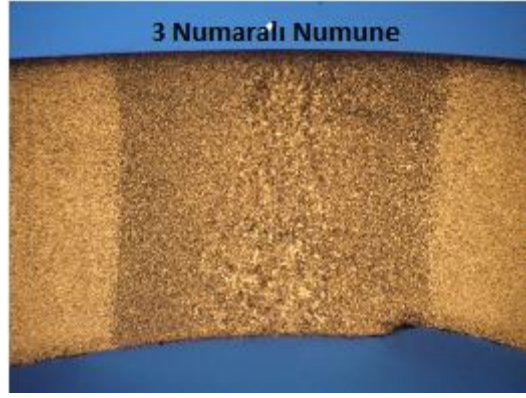
Yapılan 18 adet farklı üretimde 13 adet numuneye yassılma testi uygulanmıştır. 1, 8, 9, 15 numaralı numunelerde başarılı yüksek frekans indüksiyon kaynağı elde edilemediğinden test uygulanmamış saat 12 ve 3 yönünde testleri geçemedikleri belirtilmiştir. 13 numaralı numune ile aynı hız ve güç değerinde çalışılarak oluşturulan 2, 6, 12 numaralı numunelerde de 35 m/dk hız ile tasarlanan 60 kw güç yerine 50 kw ile alışılabilmemiştir. Numune no 13 test edilmemiş ve numune alınmamıştır. Yassılma Testini geçtiği kabul edilmiştir (izelge 7.7) .

Çizelge 7.7 : Yassıltma testi sonuçları.

Numune No	Kılıçlı Gapleri [mm]	Kaynakaltı çapı [mm]	Hız [m/dk]	Fiili güç [kW]	Sıcaklık [C°]	Saat 12 yönünde yassıltma	Saat 3 yönünde yassıltma
1	1.8	26.4	50	48	-	Red	Red
2	1.8	26.4	35	51	1074	Kabul	Kabul
3	1.8	26.4	50	60	998	Red	Kabul
4	1.8	26.4	35	44	975	Kabul	Red
5	1.2	26.4	35	45	1075	Kabul	Kabul
6	1.2	26.4	35	49	1080	Kabul	Kabul
7	1.2	26.4	50	60	1080	Kabul	Kabul
8	1.2	26.4	50	46	905	Red	Red
9	1.8	25.8	50	-	-	Red	Red
10	1.8	25.8	35	46	967	Kabul	Kabul
11	1.8	25.8	50	62	1010	Kabul	Kabul
12	1.8	25.8	35	54	1060	Kabul	Kabul
13	1.2	25.8	35	-	-	Kabul	Kabul
14	1.2	25.8	50	59	1063	Kabul	Kabul
15	1.2	25.8	50	-	-	Red	Red
16	1.2	25.8	35	45	1092	Kabul	Red
17	1.6	25.8	50	61	976	Kabul	Kabul
18	0.7	25.8	50	58	1000	Kabul	Kabul

1, 8, 9, 15 numaralı numunelerde hız değeri 50 m/dk karşın 46 kw güç değerinin daha önce bulunan denklem 6.3'te çıkan 50 m/dk için ideal güç değeri olan 58 kw değerinden düşük olması sebebiyle sağlam kaynak elde edilememiştir.

3 numaralı numunede Şekil 7.12'de görüldüğü gibi saat 12 yönünde göçmeye rastlanmıştır. Bu tarz bir göçme borunun iç yüzeyinde kaynak bölgesinde zayıflığın, çizginin ya da bindirme denilen bant kenarlarının hizasız kaynaması sonucu oluşabilecek bir hatanın ürünüdür. Şekil 7.11 incelendiğinde buna iç çapakta görülen bindirmenin sebep olduğu düşünülmektedir.

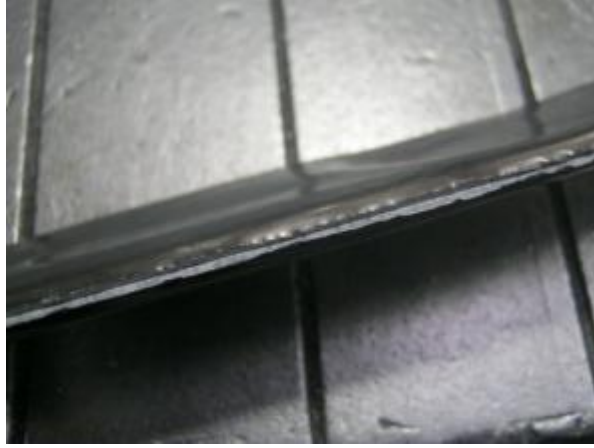


Şekil 7.11 : 3 numaralı numunenin metalografik muayene resmi.

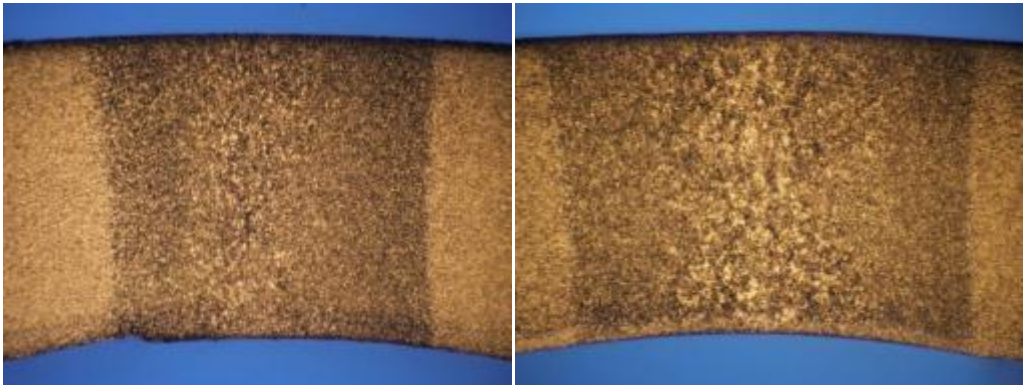


Şekil 7.12 : 3 numaralı numunede saat 12 yönünde göçme.

4 numaralı numunede Şekil 7.13'deki gibi saat 3 yönünde kaynak bölgesinden açtığı görülmüştür. Şekil 7.14'e bakıldığında sadece kılıçlı gapleri farklı olan numune 4 ve numune 5 metalografik muayenelerine göre; numune 4 üretiminde gap ölçüsü daha büyük olduğundan birbirine bakan bant kenarları daha uzak mesafeden geçtiğinden bant kenarlarında ısınan bölge daha dar bir alanı kapsadığı düşünülmektedir. Yeterli genişlikte bölgenin ısınmaması kaynakaltı makaralarında verilen baskı ile ortadaki ferrit bölgesindeki inklüzyonların dışarı atılamamasına ve ferritin oluşmamasına sebep olduğu ve tam ortadan Şekil 7.13'deki gibi yırtılmaya sebep olduğu düşünülmektedir.

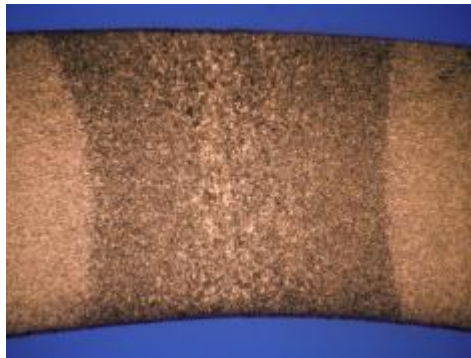


Şekil 7.13 : 4 numaralı numunede saat 3 yönünde göçme.



Şekil 7.14 : 4 (solda), 5 (sağda) numaralı numunelerin metalografik muayenesi.

Şekil 7.15'deki 16 numaralı numune incelendiğinde 4 numaralı numunede olduğu gibi ferrit çizgisi oluşmamıştır. Ferrit çizgisinin oluşması gereken bölgede karbür ve oksit inklüzyonları dışarı atılamayıp yoğunlaştığından kaynak bölgesinden kırılma yaşandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.15 : 16 numaralı numunenin metalografik muayenesi.

7.5 Konik Genişletme Testi Sonuçları

Yapılan 18 adet farklı üretimde 13 adet numuneye genişletme testi uygulanmıştır. 1, 8, 9, 15 numaralı numunelerde başarılı yüksek frekans indüksiyon kaynağı elde edilemediğinden test uygulanmamış konik genişletme testini geçemedikleri belirtilmiştir. 13 numaralı numune ile aynı hız ve güç değerinde çalışılarak oluşturulan 2, 6, 12 numaralı numunelerde de 35 m/dk hız ile tasarlanan 60 kw güç yerine 50 kw ile alışılabılmıştır. Numune no 13 test edilmemiş ve numune alınmamıştır. Genişletme Testini geçtiği kabul edilmiştir (izelge 7.8).

13 adet numuneden 5’er adet 15 cm uzunluğuunda parçalar kesilip kaynağın başarısı test edilmiştir.

Çizelge 7.8 : Konik genişletme testi sonuçları.

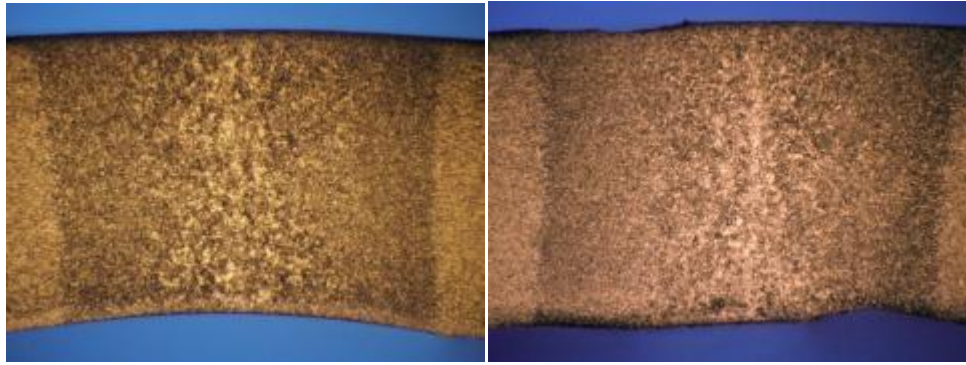
Numune No	Kılıçlı Gapleri [mm]	Kaynakaltı apı [mm]	Hız [m/dk]	Fiili güç [kW]	Sıcaklık [C°]	Konik Genişletme
1	1.8	26.4	50	48	-	Red
2	1.8	26.4	35	51	1074	5/5
3	1.8	26.4	50	60	998	5/5
4	1.8	26.4	35	44	975	3/5
5	1.2	26.4	35	45	1075	5/5
6	1.2	26.4	35	49	1080	4/5
7	1.2	26.4	50	60	1080	5/5
8	1.2	26.4	50	46	905	Red
9	1.8	25.8	50	-	-	Red
10	1.8	25.8	35	46	967	5/5
11	1.8	25.8	50	62	1010	5/5
12	1.8	25.8	35	54	1060	5/5
13	1.2	25.8	35	-	-	5/5
14	1.2	25.8	50	59	1063	5/5
15	1.2	25.8	50	-	-	Red
16	1.2	25.8	35	45	1092	Kabul
17	1.6	25.8	50	61	976	Kabul
18	0.7	25.8	50	58	1000	Kabul

2 numaralı numune konik genişletme testinde 5 parça numuneden 3 adedinde kaynağın kenarından açtığı görüldü. Kaynağın i apağının alındığı bölgedeki iziğin buna neden olduğu düşünülmektedir.

4 numaralı numune konik genişletme testinde 5 parça numunede 2 adedinde kaynak bölgesinden açtığı görülmüştür. Kaynak bölgesinde zayıflığın yassılتما testinde belirtildiği gibi yeterli genişlikte bölgenin ısınmaması kaynakaltı makaralarında

verilen baskı ile ortadaki ferrit bölgesindeki inklüzyonların dışarı atılamamasına ve bunun da ferritin oluşmamasına sebep olduğu düşünülmektedir.

6 numaralı numune konik genişletme testinde 5 parça numunede 1 adedinde kaynak bölgesinden açtığı görülmüştür. 5 numaralı numune ile 6 numaralı numune arasındaki fark 5 numaralı numune 45 kw güç ile 6 numaralı numune 49 kw güç ile üretilmesidir. Şekil 7.16’da görüldüğü gibi 6 numaralı numunede kaynak bölgesinin tam ortasında bulunan yumuşak ferrit bölgesini tam oluşturacak derecede ısı girdisinin elde edilmemesi sonucu kaynak bölgesinde kavuşan iki kenar bir miktar sol kenar aşağı sağ kenar yukarı olmak üzere kaymıştır. Bu formdaki asimetrikliğin kaynak zayıflığına sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.16 : 5 (solda), 6 (sağda) numaralı numunelerin metalografik muayenesi.

7.6 Kripling Testi Sonuçları

Kripling Testi tüm sağlam kaynaklı 13 numuneye hızı 4 cm/s’den daha küçük olan hidrolik pres uygulanmış yassılma testini geçemese de bu testi ürünler geçebilmiştir (Şekil 7.17). Ancak 60 bar hidrolik basınçta 4 cm/s hız ile yapılan kripling testi ile sadece 4 numaralı numunede kaynak bölgesinden açmaya rastlanmıştır (Şekil 7.18).



Şekil 7.17 : 13 adet numuneye uygulanan kripling işlemi sonrası numuneler.



Şekil 7.18 : 4 numaralı numuneye uygulanan kripling işlemi sonrası durum.

4 numaralı numune saat 3 yönünde yassılma ve konik genişletme testlerini geçememiş ve müşteri prosesine benzer olan kripling testinde de kaynak bölgesinden açtığı görülmüştür. Bu testin başarısı için şekil verme hızının 4 cm/sn fazla olması gerektiği belirlenmiştir.

7.7 Metalografik Muayene Sonuçları

Daha önce bahsedilen kritik frekans değeri formülüne göre;

$$f_{\text{kritik}} = \frac{v_0}{\pi^2 \mu \sigma \epsilon y_0}$$

Deney hız değerlerine bağlı kritik frekans değerleri, 2 farklı hız faktörü için hesaplanmış ve her iki hız durumunda da fiili çalışılan frekans değerleri ile karşılaştırıldığında “Termal Mod” içinde çalışıldığı görülmüştür (Çizelge 7.9). Buna göre ITAB genişliği teorik olarak hesaplanmış ve metalugrafik muayene sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 7.10).

Çizelge 7.9 : Termal Mod şartı ve ITAB genişlik formülü.

Termal Mod	
Şart	$f_{işletme} \gg f_{kritik}$
ITAB	$ITAB = \sqrt{\pi \left(\frac{y_0}{V_0}\right) \epsilon}$

Denklemlerde kullanılan malzemenin

Manyetik Permabilitesi $\mu = 1.28 \times 10^{-6} \frac{H}{m}$

Elektrik İletkenliği $\sigma = 875000 \frac{Siemens}{m}$

$\frac{Isı \text{ iletkenliği}}{Isı \text{ sığası} \times \text{yoğunluk}} \quad \epsilon = 0.05018 \frac{cm^2}{sn}$

İndüktör bitişinden kaynak altı makara merkezi Kaynak V mesafesi y_0
 $= 71 \text{ mm}$

Çizelge 7.10 : Numunelerin fiili ITAB genişlikleri ve teorik değerler.

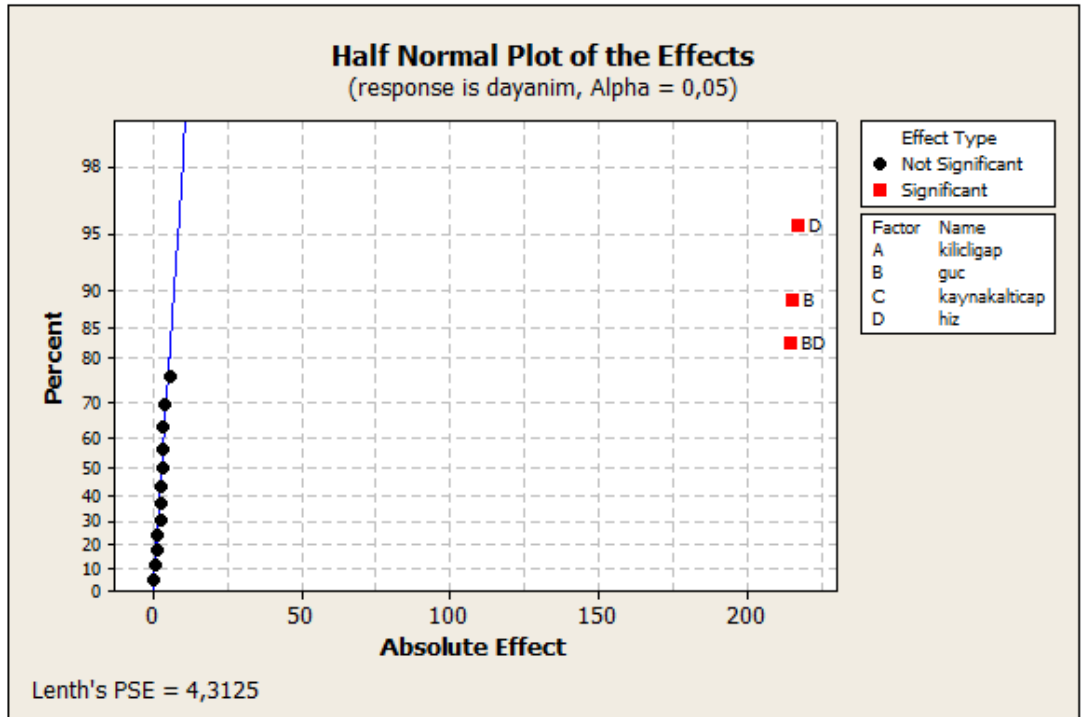
Numune No	Hız [m/dk]	Frekans [kHz]	Frekans/Kritik Frekans	Termal Teorik ITAB genişliği [mm]	Elektriksel Teorik ITAB genişliği [mm]	Fiili ITAB genişliği [mm]
2	35	396	2.678	0.565	0.346	1.719
3	50	397	1.879	0.473	0.346	1.494
4	35	395	2.671	0.565	0.346	1.527
5	35	395	2.671	0.565	0.346	1.953
6	35	395	2.671	0.565	0.346	2.040
7	50	395	1.869	0.473	0.346	1.672
10	35	393	2.657	0.565	0.346	1.270
11	50	397	1.879	0.473	0.346	1.144
12	35	395	2.671	0.565	0.346	1.385
14	50	396	1.874	0.473	0.346	1.284
16	35	395	2.671	0.565	0.346	1.530
17	50	398	1.883	0.473	0.346	1.083
18	50	397	1.879	0.473	0.346	1.599

7.8 Deney Tasarımı Sonuçları

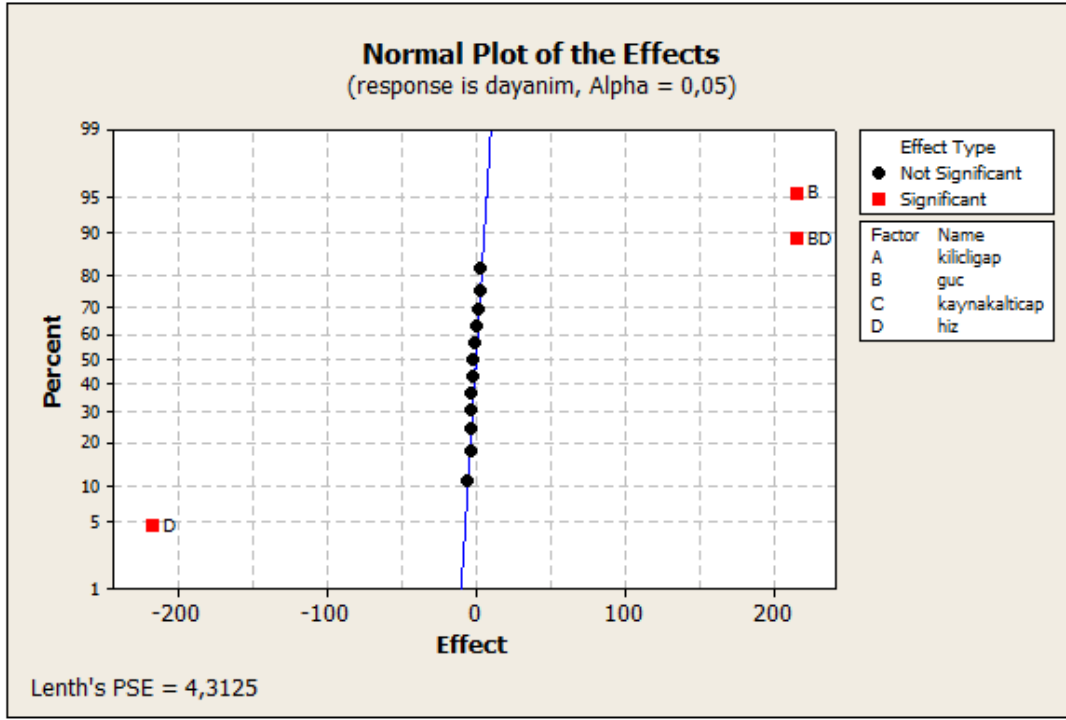
Deney tasarımı boru makinesi için en önemli 4 faktör olan makine hızı, kaynak gücü, kaynakaltı makarası çapı ve kılıçlı makaraları arası mesafe için alt üst noktalarında Çizelge 7.11’de gösterildiği gibi bir planda deneyler gerçekleştirilerek ortalama çekme dayanımına göre değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 7.11 : Numunelerin ortalama çekme dayanımları.

Deney	Kılıçlı Gapleri [mm]	Güç(Fiili) [kWatt]	Kaynakaltı Çapı [mm]	Hız [m/dk]	Ortalama Çekme dayanımı [MPa]
1	1.8	48	26.4	50	0
2	1.8	51	26.4	35	438.5
3	1.8	60	26.4	50	420.5
4	1.8	44	26.4	35	428.5
5	1.2	45	26.4	35	436.0
6	1.2	49	26.4	35	420.5
7	1.2	60	26.4	50	430.5
8	1.2	46	26.4	50	0
9	1.8	0	25.8	50	0
10	1.8	46	25.8	35	426.0
11	1.8	62	25.8	50	429.5
12	1.8	54	25.8	35	432.5
13	1.2	49	25.8	35	438.0
14	1.2	59	25.8	50	438.0
15	1.2	0	25.8	50	0
16	1.2	45	25.8	35	436.0

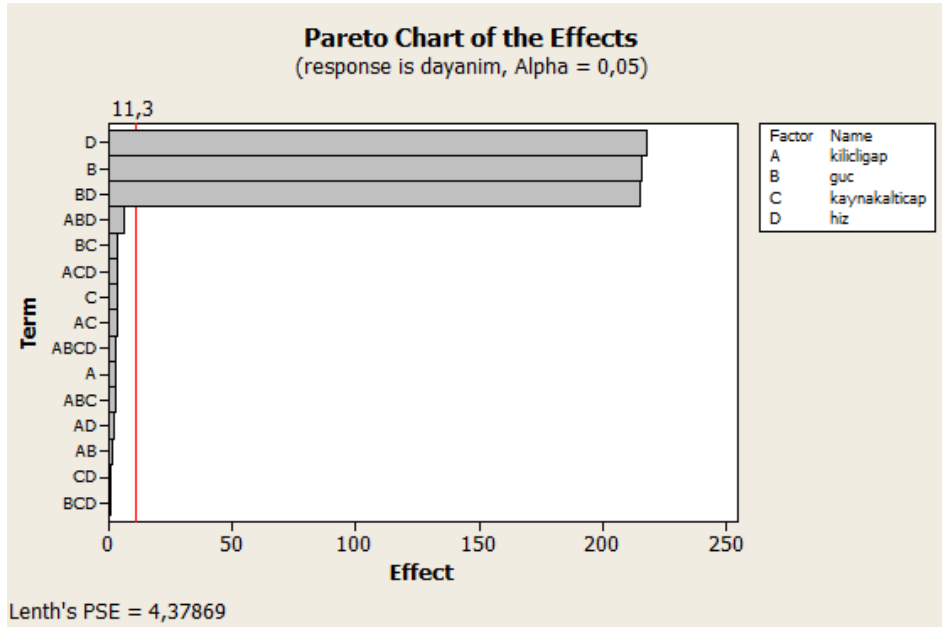


Şekil 7.19 : Faktörlerin dayanıma etki yüzdesi yarım normal grafiği.



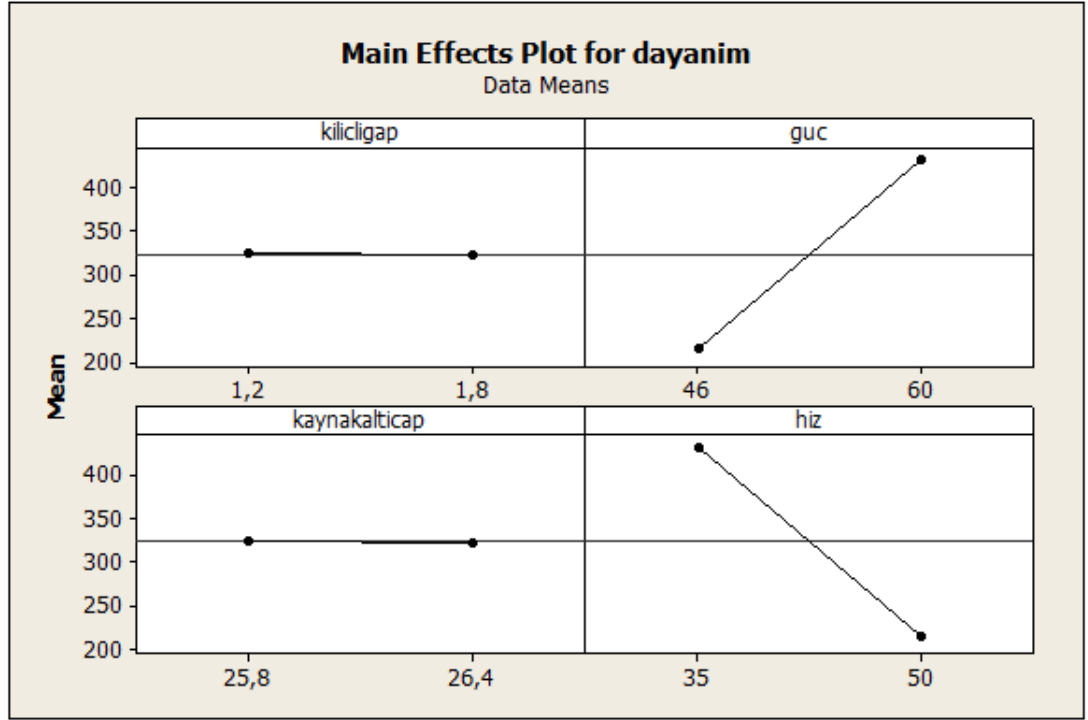
Şekil 7.20 : Faktörlerin dayanıma etki yüzdesi tam normal grafiği.

Minitab yazılımı kullanılarak yukarıdaki şekil 7.19 ve 7.20'deki faktörlerin hangilerinin önemli olduğunu ve faktörlerin aralarındaki ilişkilerin bulunması amaçlı yapılmıştır.



Şekil 7.21 : Faktörlerin dayanıma etki pareto diyagramı.

Şekil 7.21'deki Pareto grafiğine bakıldığında dayanıma etkisi en fazla olan sırasıyla hız, güç ve hız güç ilişkisidir.

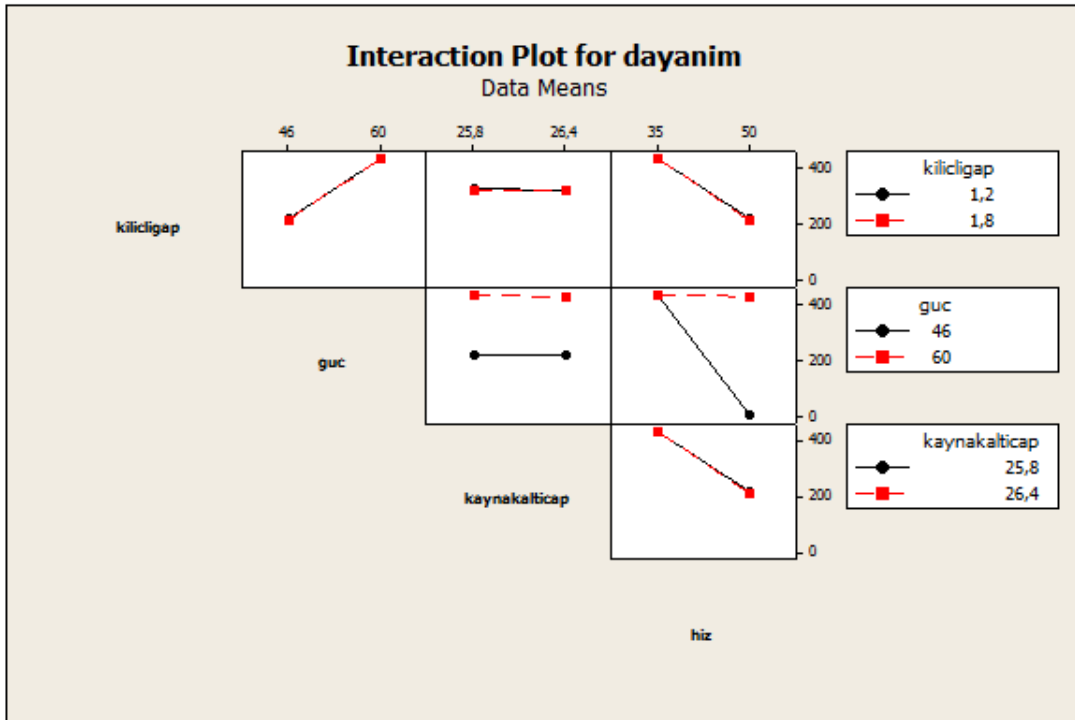


Şekil 7.22 : Dayanım için faktörlerin etki grafiği.

Şekil 7.22'ye göre; kılıçlı makara gapleri ve kaynak altı çapı alt ve üst noktalarında çalışılması durumunda dayanıma büyük etkileri olmadığı ancak her iki faktör içinde alt noktalarda bir miktar dayanımın daha iyi olduğu söylenebilir.

Güç değeri arttıkça kaynak dayanımı artmaktadır. Bu güç değerindeki artışın eriyen malzeme miktarı ve sıcaklığın artışı ile açıklanabilir.

Hız değeri arttıkça dayanımın düştüğü görülmektedir. Hızdaki artış kaynak bölgesinin eriyik malzeme oluşturacak kadar zamanının olmaması ve alınan ısı miktarının düşük kalması ile açıklanabilir.



Şekil 7.23 : Dayanım için faktörlerin birbiri ile olan ilişki diyagramı.

Şekil 7.18’de görüldüğü gibi güç ile hız değerleri arasında bir ilişki mevcuttur.güç değeri alt noktada iken hız değerindeki artış dayanımı düşürmektedir. Güç değeri üst noktada iken hız değerindeki artış dayanımı bir miktar düşürmektedir.

Yukarıdaki bilgiler ışığında yapılan regresyon analizi sonucunda

$$\text{Kaynak dayanımı} = 4724 - 71,4 \times \text{Güç} - 123 \times \text{Hız} + 2,04 \times \text{Güç} \times \text{Hız}$$

İlişkisi elde edilir.

Regression Analysis: dayanım vs güç; hız; güçxhız

The regression equation is

$$\text{dayanim} = 4724 - 71,4 \text{ guc} - 123 \text{ hiz} + 2,04 \text{ gucxhiz}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4724,33	66,83	70,69	0,000

guc	-71,426	1,250	-57,13	0,000
-----	---------	-------	--------	-------

hiz	-122,719	1,549	-79,24	0,000
-----	----------	-------	--------	-------

gucxhiz	2,04226	0,02897	70,50	0,000
---------	---------	---------	-------	-------

S = 6,08319 R-Sq = 99,9% R-Sq(adj) = 99,9%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	557838	185946	5024,86	0,000
Residual Error	12	444	37		

Total	15	558282			
-------	----	--------	--	--	--

Source	DF	Seq SS
guc	1	185223
hiz	1	188682
gucxhiz	1	183934

Unusual Observations

Obs guc dayanim Fit SE Fit Residual St Resid
16 60,0 420,50 432,38 3,04 -11,88 -2,25R

R denotes an observation with a large standardized residual.

7.9 Genel Sonuçlar ve Yorumlar

Mikroalaşımli malzemelerde rastlanılan segregasyonun kılıçlı makaralar arası mesafeyi düşürerek ve kaynakaltı makaralarını çapını arttırarak içeriye almanın mümkün olduğu ancak getireceği kaynak zayıflığı riskinin de göz önünde bulundurulması gerektiği görülmüştür. Bant genişliği azaltılarak segregasyon çizgisinin ve metal akış çizgilerinin içeri alınması da mümkündür.

Üretilen borularda iç çapak bölgesi iç çapak aparatı ile alındığından ve faktörler değiştirilirken iç çapak bölgesine etkisi olabilecek hiçbir faktöre dokunulmadığından saat 12 yönünde yassıltmada kaynak bölgesindeki göçmenin üzerinde yoğunlaşmamıştır. Ayrıca yine iç çapak bölgesindeki problem nedeniyle kaynak bölgesi yanından ve malzeme kaynaklı konik genişletme testini geçemeyen numune sonuçları incelemede göz önünde bulundurulmamıştır.

Kılıçlı makaraların gaplerinin düşük olması bant kenarlarının birbirine yaklaşması nedeni yaklaşma etkisi sayesinde kaynatılacak bant kenarlarında ısının daha derine nüfuz etmesi ve bunun da olumlu etkileri numune 4 ve 5 ile numune 16 ve 10 karşılaştırıldığında görülmektedir. Kademeli olarak numune 11, 14, 17, 18’de gapler azaltıldığında ITAB bölgesi genişliğinin genişlemesi bunu desteklemektedir.

Kaynak dikişi dikine ve boyuna yapılan çekme test sonuçlarındaki iki çekme değerinin ortalaması alınarak elde edilen dayanım değerleri üzerinden deney tasarımı yapılmıştır.

Çekme testi kaynak çekme yönünde dik numunelerde birim şekil değişimi miktarı ortalama %17 çıkmıştır. Kaynaksız malzemeye göre % 37 azalmıştır. Bunun sebebi boru üretimindeki kaynakaltı makarasında ve ölçü veren kalibre makaralarındaki soğuk redüksiyondur. Kaynak çekme yönündeki numunelerde birim şekil değişimi ortalama % 7,5 çıkmıştır. Kaynak bölgesinin dayanımındaki artış daha gevrek bir yapının oluşmasını sağlamıştır. Birim şekil değişimi olarak malzemenin birim şekil değişiminin % 70 oranında azalmıştır. Tahribatlı testlerde kaynak bölgesinin hasarlandığı 4 ve 16 numaralı numunelerde çekme akma ve uzama değerlerinin herhangi birinde olumsuz ortalama dışında bir değere rastlanmamıştır.

Kripling testini geçemeyen numune 4 dayanım değeri olarak ortalamanın altında çıkmıştır. Saat 3 yönünde yassılتما testinde kaynak bölgesinden aan 16 numaralı numune ortalama çekme dayanım değeri olarak ortalama 432 MPa değerinin üstünde çıkmasına rağmen testi geçememiştir. Kaynak bölgesinin kripling işlemine geçebilmesi için dayanım ile doğrudan bir bağlantı kurulamamıştır.

Kripling testinin yavaş yapılması ve istenilen formu verebilecek kısıalıkta borunun kesilmemesi testin doğru sonuç vermemesini sağlayabilmektedir.

Kılıçlı Gap değeri numune 18, 17, 14, 11'deki gibi arttıa kaynak pozisyonu çekme yönüne dik olduğunda çekme dayanımının azaldığı görülmüştür.

4 numaralı numune hem kripling hem saat 3 yönündeki yassılتما testini geçemezken; numune 16 kripling testini geçebilmesine rağmen saat 3 yönündeki yassılتما testini geçememiştir. Saat 3 yönünde tam yassılتما olarak bu testin gerçeği daha doğru yansıttığı düşünülmektedir.

Deney tasarımı çalışmasında hız, güç, kaynakaltı çapı ve kılıçlı makara arası mesafe faktörlerinden kaynak bölgesi dayanımına en büyük etkiye sırasıyla hız, g ve hız ile g etkileşimine bağlı olduğu ve bu değerler üzerinden dayanımı tahmin edici bir yöntem önerilmiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kaynak bölgesinin kripling olarak adlandırılan işleme dayanacak malzemeyi seçmek ve bu malzeme ile çalışılması gereken en iyi makine ayarlarını belirlemek amacı ile 16 farklı deney yapılmıştır. Bu deneylerde kaynak gücü, makine hızı, kılıçlı makaraları arası mesafe ve kaynakaltı çapı faktörlerinin alt ve üst değerlerinde çalışılarak kaynak dayanımını etkileyen faktörlerin optimum değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu deneyler sonucunda yapılan çekme testleri, kaynak bölgesi çekme yönüne dik ve paralel olacak şekilde yapılmıştır. Kaynak bölgesinin kripling işleminde karşılaşacağı kuvvetlerin kaynak yönüne dik ve paralel olacağı düşünüldüğünden çekme testi sonuçları bu iki değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalarda şu sonuçlar elde edilmiştir:

- 1- Pcm değerinin düşük olduğu malzemeler alternatiflerine göre daha iyi kaynak dayanım özellikleri taşır.
- 2- Segregasyon bulunan malzemede boru yapılacak bandın genişliği 1 mm düşük tutularak akış çizgilerinin içeri alınması ile segregasyonun boru iç ve dış yüzeylerine doğru sonlanmasının engellenebileceği düşünülmüştür.
- 3- Segregasyon bulunan malzemede kaynakaltı makaraları arası mesafenin düşürülüp kaynakaltı makara çapının arttırılması ile segregasyonun boru iç ve dış yüzeylerine doğru sonlanmasının engellenebileceği görülmüştür; ancak bu şekilde ideal kaynak geometrisine ulaşamadığı gözlenmiştir.
- 4- Ti, Nb gibi mikroeklentilerin boyutlarının 2-5 mikron arasında kaba taneli olarak kaynak bölgesinde bulunması çentik etkisi yapacağından çatlamalara neden olabileceği görülmüştür.
- 5- Tahribatlı testleri geçen ve geçemeyen tüm numunelerden kaynak bölgesine dik yapılan çekme testinde kopma, kaynak bölgesi dışında malzemedan gerçekleşmiştir. Bu testte kaynak içermeyen malzeme bölümüne göre akma dayanımı % 10 artmakta; çekme dayanımı % 6 artmakta; %

kopma uzaması % 37 azaldığı görülmüştür. Aynı numunelerde kaynak bölgesine paralel yapılan çekme testinde kaynak içermeyen malzeme bölümüne göre akma dayanımı % 20 artmakta; çekme dayanımı % 19 artmakta; % kopma uzaması % 72 azalmaktadır.

6- Sağlam ve ITAB geometrisi uygun olan 2 numaralı numune ile tahribatlı testleri ve kripling testini geçemeyen 4 numaralı numune karşılaştırıldığında kaynak bölgesindeki sertlik değerinin 4 numaralı numunede 195 Vickers, 2 numaralı numunede 152.5 Vickers olduğu görülmüştür. Ayrıca 4 numaralı numunede kaynak bölgesinde ferrit çizgisinin tek tarafında sertliğin fazla miktarda yükseldiği görülmüştür. Bu durumun sebebi diğer değerler sabit bırakılarak güç değeri % 13 daha düşük olarak çalışıldığında kaynak bölgesinin yeterli ısınmaması sonucu bu bölge içerisindeki inklüzyonların tam atılamaması olabilir.

7- Saat 3 yönünde yassılma testini geçen numuneler kripling testini geçemediği durumlar olmaktadır; çünkü saat 3 yönünde yassılma testi esnasında kaynak bölgesi boru dış çapında çekme, iç bölgesinde basma gerilmesi uygulamaktadır. Kripling testinde ise boru kaynak bölgesi boyunca ve kaynak bölgesine dik çekme, basma kuvvetleri birlikte maruz kalmaktadır.

8- Kılıçlı makaraları arasındaki mesafe arttırıldıkça kaynağın yapılacağı bant kenarları arası mesafe artmaktadır. Yüzey etkisi sayesinde bant kenarlarında ısınan bölgeler daralmaktadır.

9- Deney tasarımı çalışması sonucunda makine hızı, kaynak gücü, kılıçlı makaraları arası mesafe ve kaynakaltı makara çapı faktörlerinden makine hızı, kaynak gücü ve makine hızı ile kaynak gücü arasındaki ilişkinin kaynak dayanımına en büyük tesiri olabileceği bulunmuştur.

Kullanılan mikro alaşımlı malzemelerin faz diyagramları ve zaman sıcaklık dönüşüm diyagramları ile bu malzemelerin kaynak bölgesinde oluşan ısı işlem simule edilerek oluşan mikro yapı saptanabilir. İkincil bir ısı işlem ile kripling işlemine dayanabilecek süneklikte ve beklenen dayanımı da elde edebilecek yapının eldesi için malzeme seçimi yanında bu tip boruların üretim sürecinde değişiklik yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Robert K. Nichols, P.E.** (1994). *High Frequency Pipe and Welding*. s.l. : Thermatool Corp.
- [2] **Scott, Dr. Paul F.** (1999). *Key Parameters of High Frequency Welding*. s.l. : Thermatool.
- [3] Url - 1 <www.virtualmacro.com> , alındığı tarih: 21.12.2010
- [4] **Nichols, Rober K.** (1999). *High Frequency Welding - The Process and Applications*.
- [5] **J, Wright.** (1999). *Optimizing Efficiency in HF Tube Welding Processes Tube and Pipe Technology*.
- [6] **Demirkol, Prof. Mehmet.** (2009). *Malzemelerin Mekanik Davranışı Ders Kitabı*. 2009.
- [7] **Smith, William F, Hadhemi Javad.** (2001). *Foundations of Material Science and Engineering (4'th ed). Foundations of Material Science and Engineering (4'th ed)*. s.l. : McGraw-Hill.
- [8] **A., Ronald.** (2007). *Materials and Processes in Manufacturing(10'th ed.)*. *Materials and Processes in Manufacturing(10'th ed.)*. s.l. : Wiley.
- [9] **Eker, Prof. Dr. Ayşegül Akdoğan.** (2009). *Çeliklerin Korozyonu Sunumu. Çeliklerin Korozyonu..*
- [10] **Lampman, Steve.** (1997). *Weld Integrity and Performance*. s.l. : ASM International.
- [11] **Samuels, Leonar E.** (1999). *Light Microscopy of Carbon Steels. Light Microscopy of Carbon Steels*. s.l. : ASM Intl.
- [12] **R. E. Smallman PhD, A.H.W. Ngan PhD.** (2007). *Physical Metallurgy and Advanced Materials. Physical Metallurgy and Advanced Materials*.
- [13] Url - 2 < www.erdemir.com.tr> .*Ereğli Demir Çelik Katalog, alındığı tarih: 12.2.2010.*
- [14] **Britannica.** (2005). *Britannica 2. Cilt*.

- [15] **J.Adamczyk.** (2006). Development of the microalloyed constructional steels. *Jamme.*
- [16] **Aran, Ahmet.** (2007). *Döküm Teknolojisi İmal Usülleri Ders Kitabı.*
- [17] **Scott, Dr. Paul F.** (1999). High Frequency Welding of Low Carbon Steel Tube. s.l. : Thermatool Corp.
- [18] **Radhakrishnan, v. M.** (2006). Welding Technology and Design.
- [19] **Robert K. Nichols, PE.** (1999). Common HF Weldning Defects.
- [20] **Robert K. Nichols, PE.** (1999). Destructive Testing of Welded Steel Tubulars. s.l. : Thermatool Corp.
- [21] Url - 3 < www.ndt-ed.org>. NDT Resource Center, alındığı tarih: 02.04.2011.
- [22] Url - 4 <www.istanbul.edu.tr/eng/metalurji/sem.htm>, alındığı tarih: 05.06.2011.
- [23] **Weng, Yuqing.** (2009). *Ultra-Fine Grained Steels.* Jointly published with Metallurgical Industry Press.

EKLER

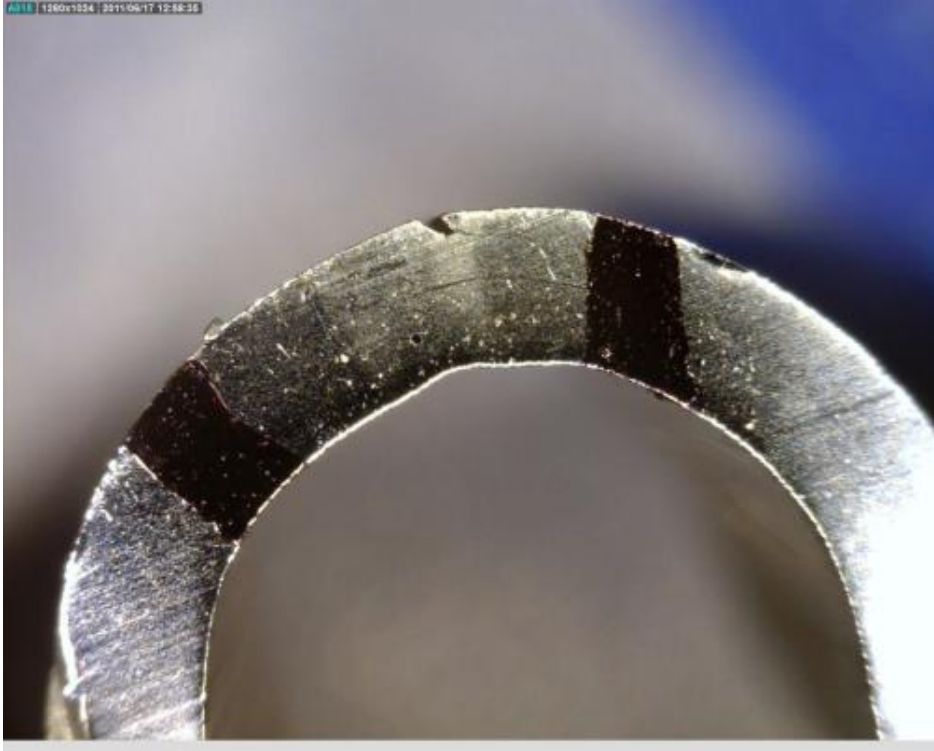
EK A : Elektron mikroskobu ile 7132 kodlu EDÇ malzemedan yapılan boru kaynağı segregasyon hatası incelemeŖi.

EK B : H320LA malzeme çatlak bölge incelemeŖi.

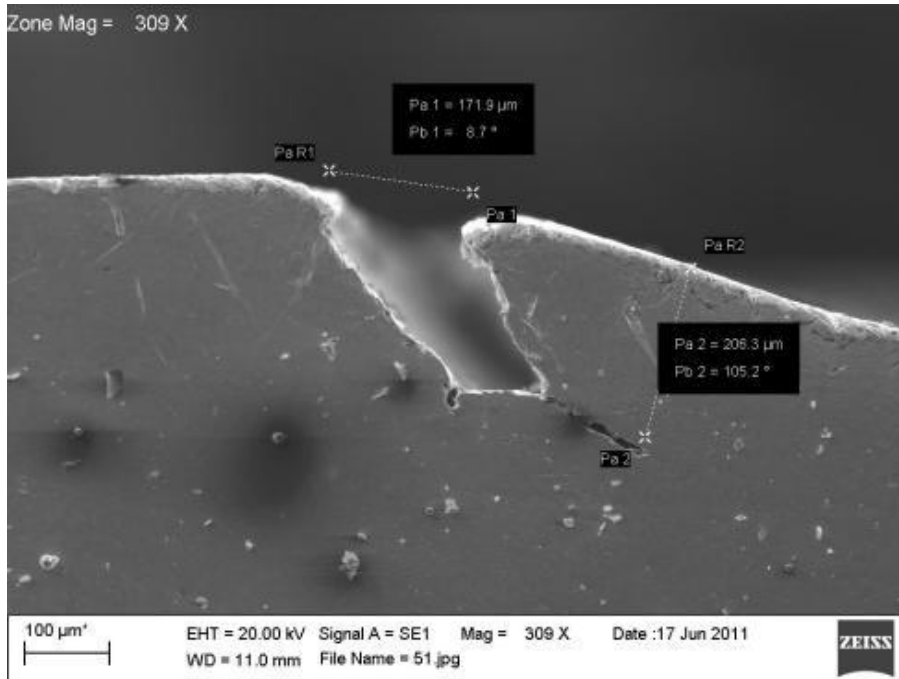
EK C : 25x1.5 H320LA metalografik muayene resimleri.

EK D : Çekme testi sonuçları.

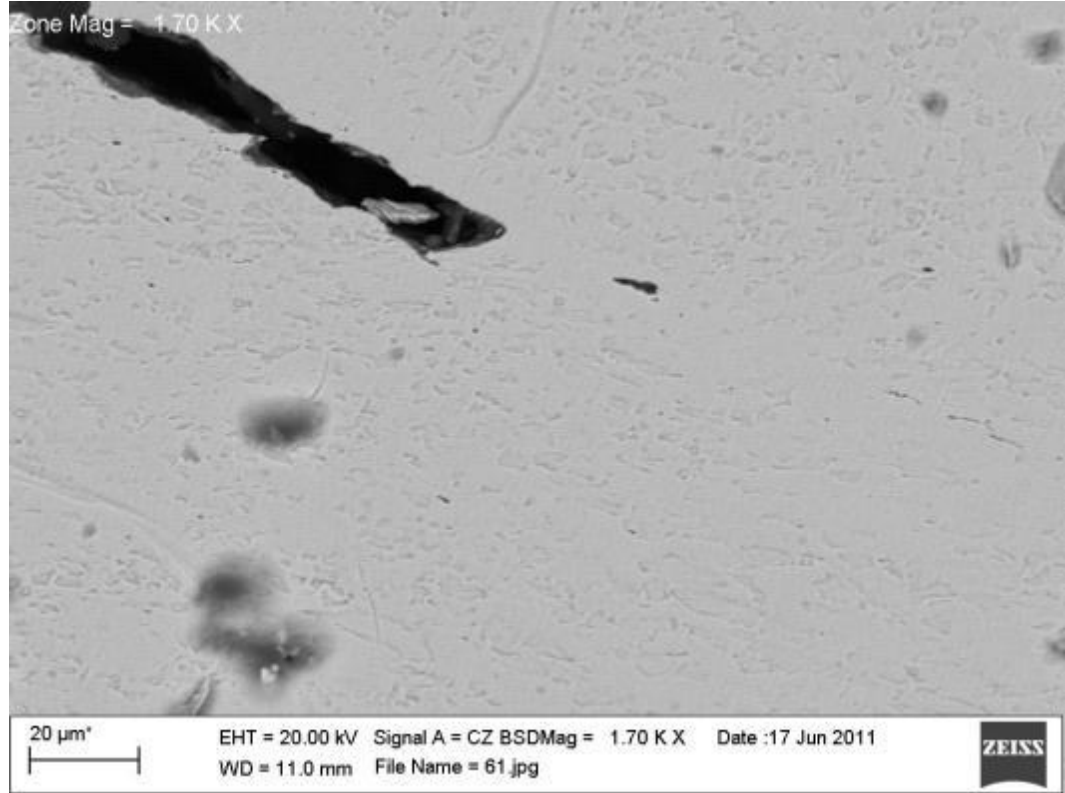
EK A



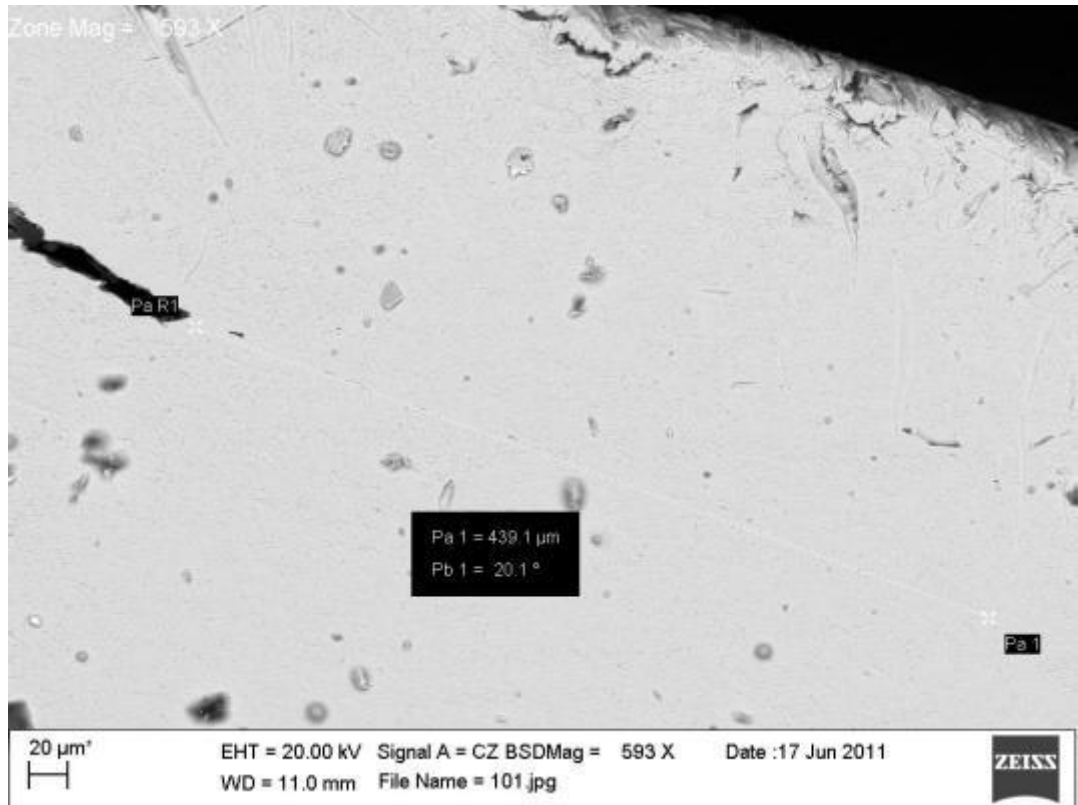
Şekil A.1 : 25x1.5 indesta şikayet edilen 7132 EDÇ bandı ile üretilen koltuk borusu.



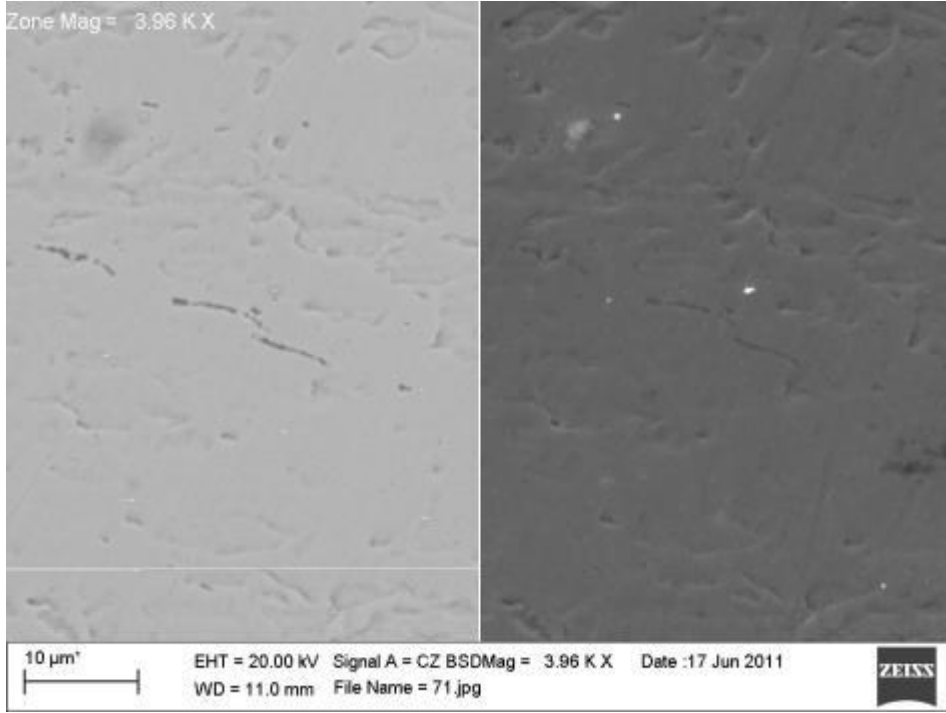
Şekil A.2 : SEM’de çatlak görüntüsü.



Şekil A.3 : Çatlağın devamında görülen kesik kesik izler.



Şekil A.4 : Çatlağın doğrultusundaki inklizyon çizgisi görüntüsü.



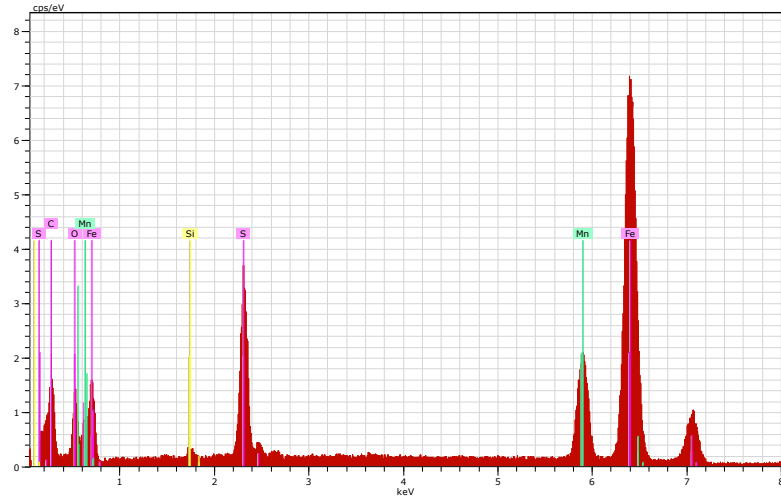
Şekil A.5 : Sol görüntü farklı malzemeleri daha koyu göstermekte.



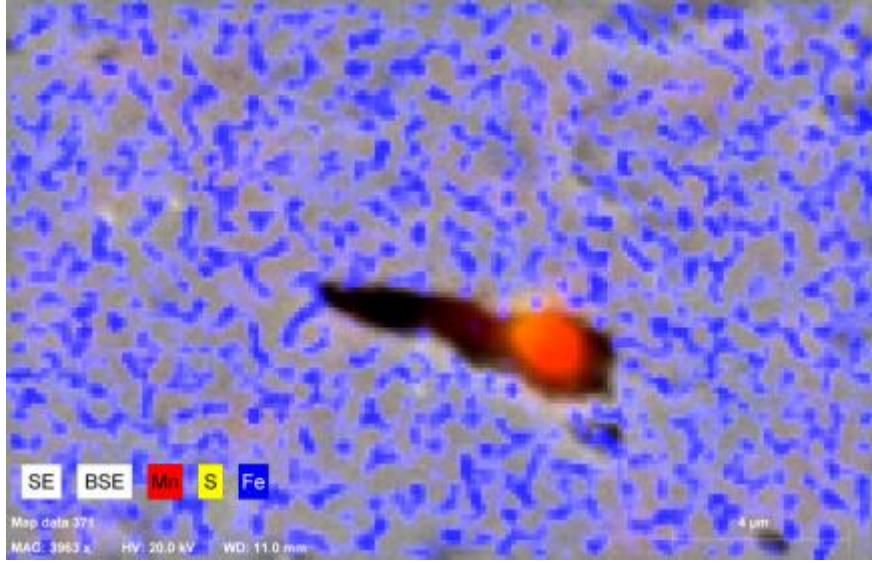
Şekil A.6 : Çatlağın devamında görünen hata.



Şekil A.7 : Çatlağın devamındaki inklizyonun kimyasal analizi Mn ve S oranının yüksek çıkması Mangan ve Kükürt içeriğinin MnS olarak 7132 EDÇ bandında biriktiği bölgeden kaynaklandığını göstermektedir.

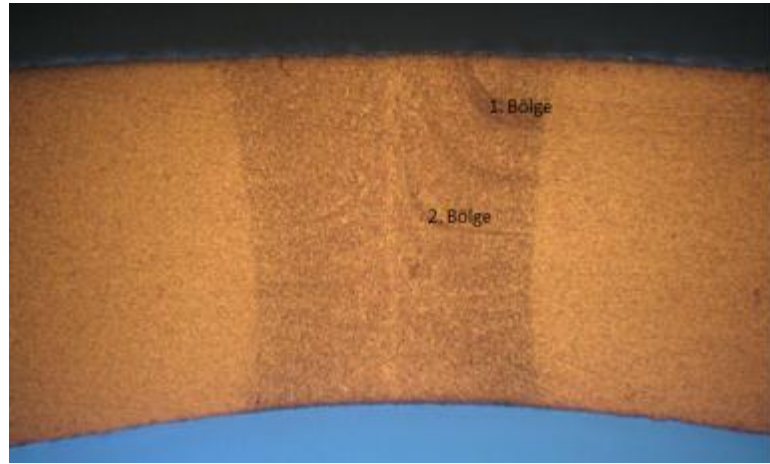


Şekil A.8 : Kare içindeki bölgenin EDX analizi.

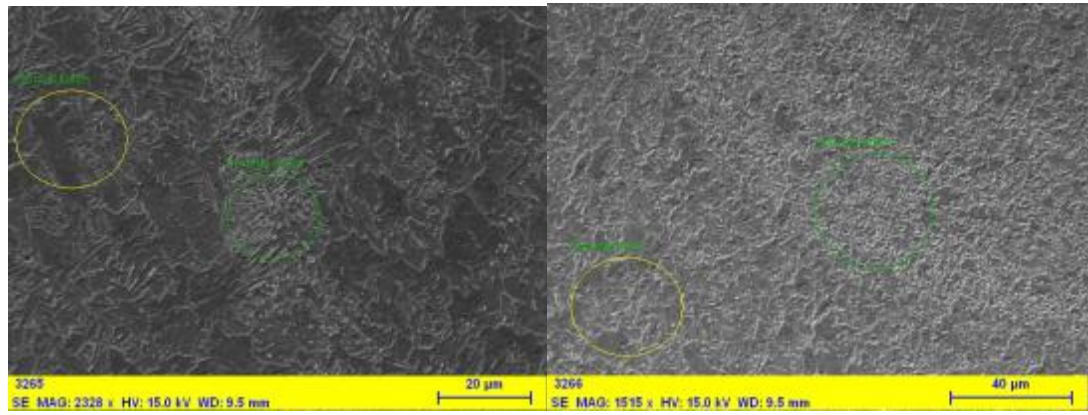


Şekil A.9 : Kare içindeki bölgenin MnS içeriği

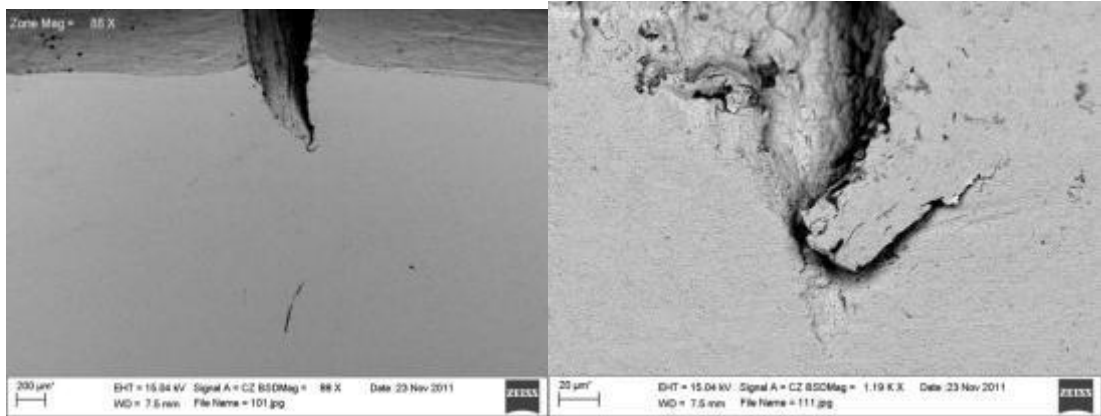
EK B



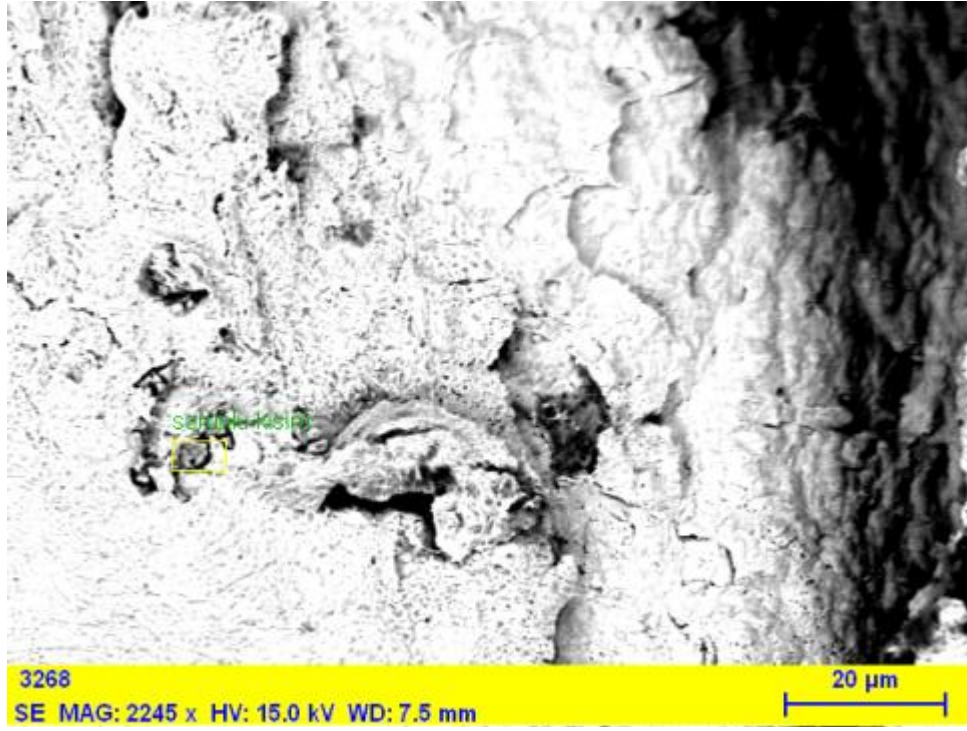
Şekil B.1 : H320 malzemeli borunun kaynak bölgesi metalografik incelemesi.



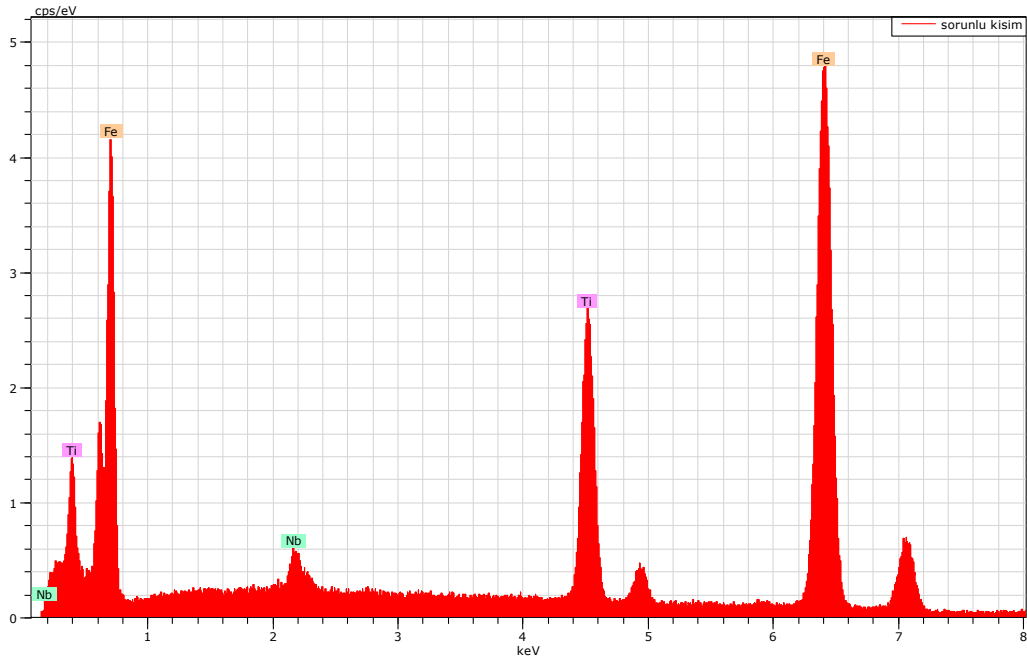
Şekil B.2 : 1.Bölge (solda) ve 2. Bölge (sağda) küçük taneli yapılar.



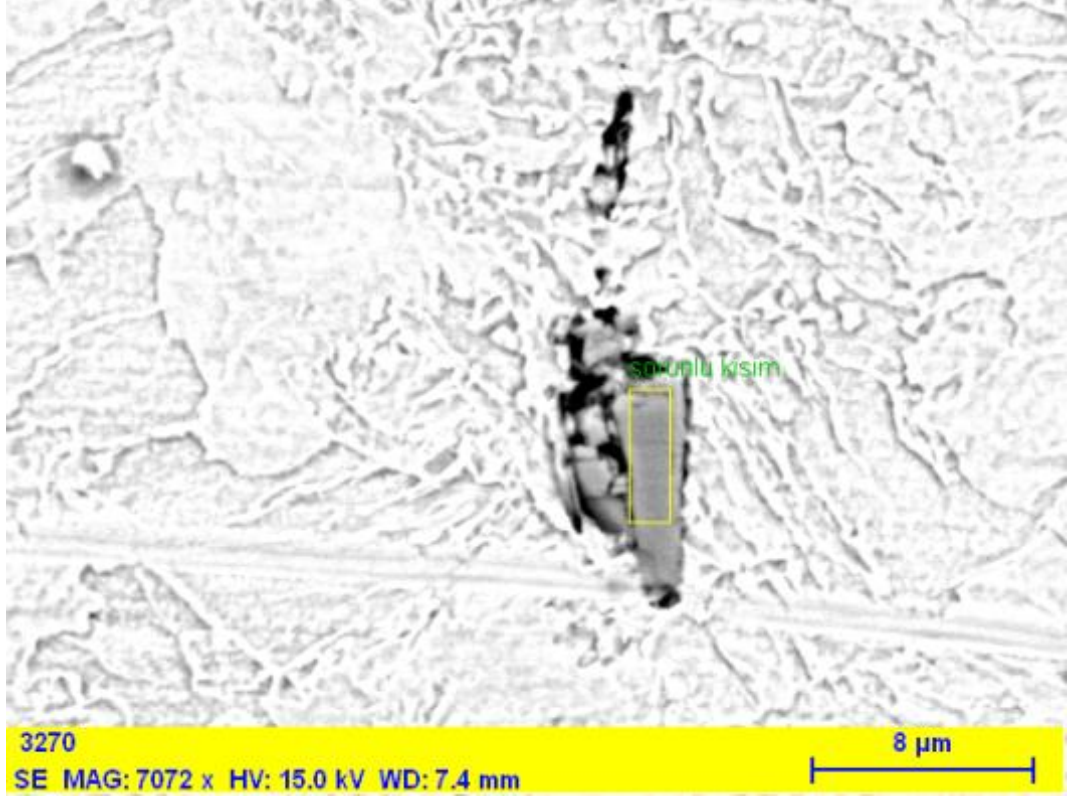
Şekil B.3 : H320 malzemeli boruda çatlayan numunenin kaynak bölgesi incelemesi.



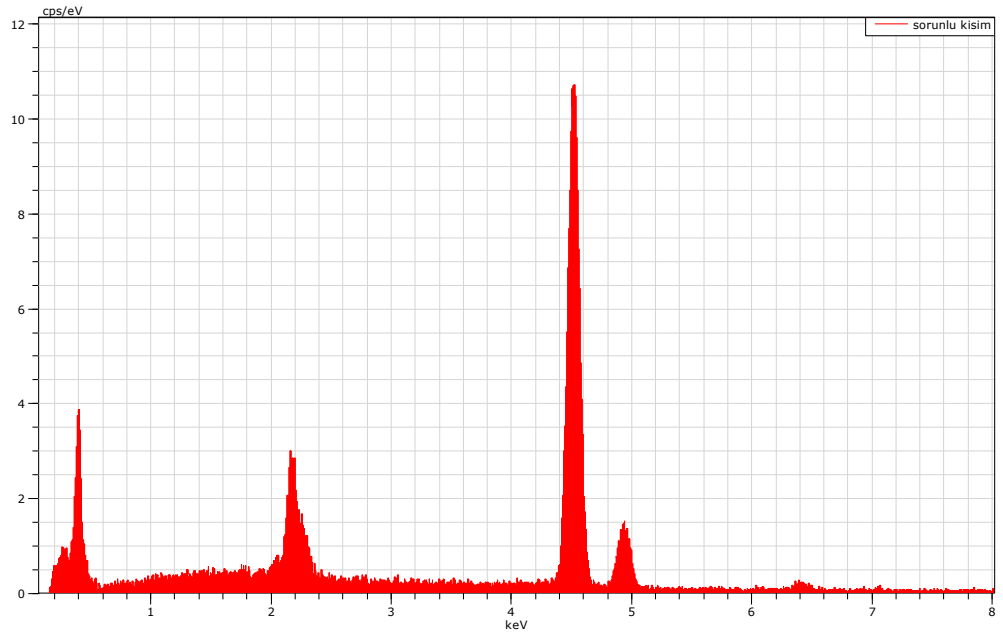
Şekil B.4 : 4 mikron çapında Ti, Nb taneleri bulunan bölge.



Şekil B.5 : EDX analizi sonrası bulunan Ti, Nb taneleri.



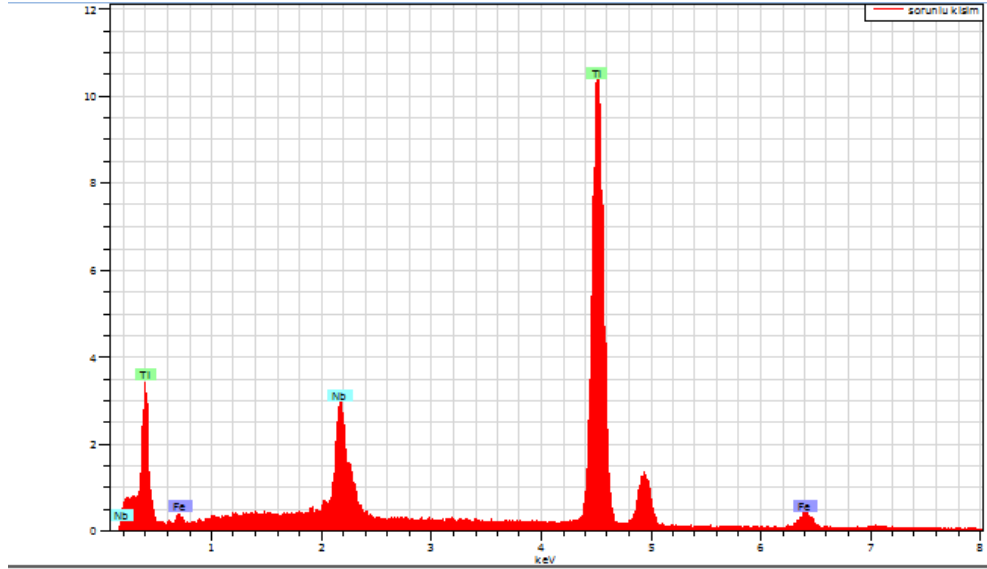
Şekil B.6 : 5 mikron çapında Ti, Nb taneleri bulunan bölge.



Şekil B.7 : EDX analizi sonrası bulunan Ti, Nb taneleri.



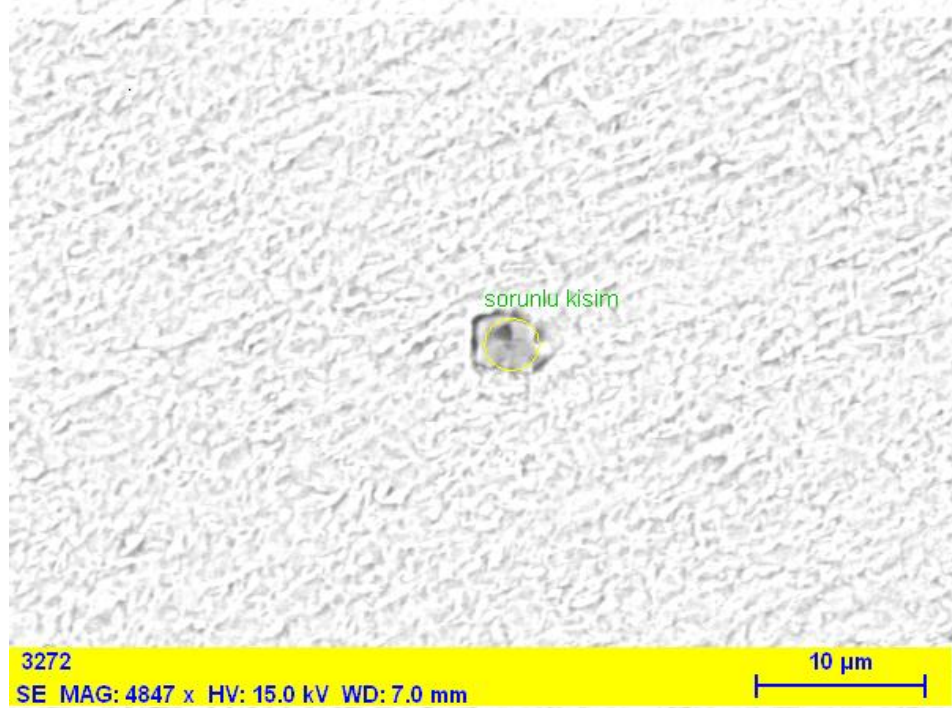
Şekil B.8 : 8 mikron çapında Ti, Nb taneleri bulunan bölge.



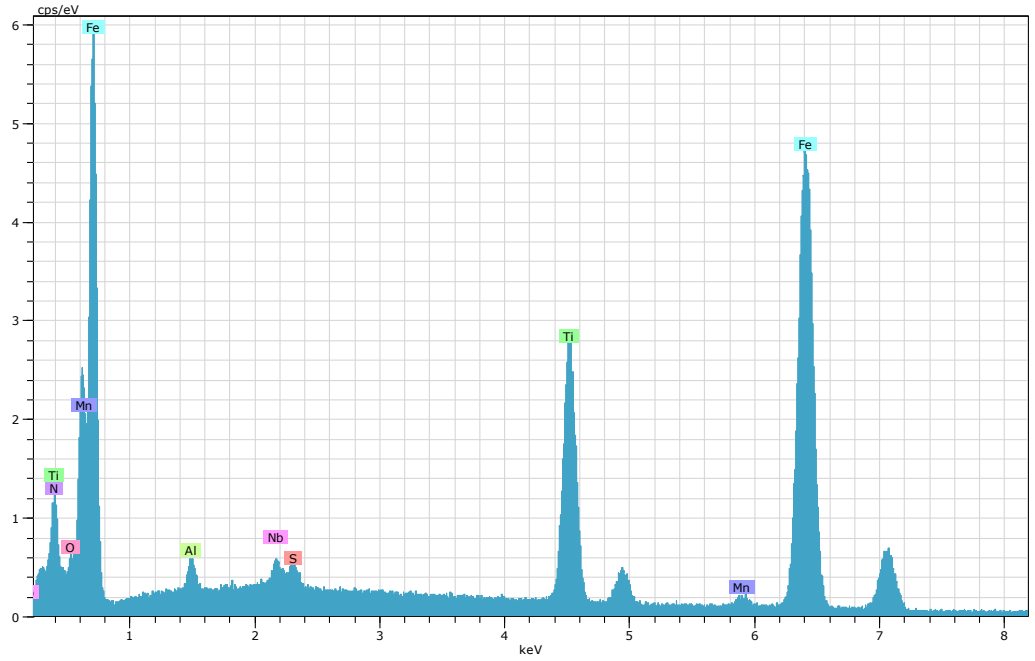
Spectrum: sorunlu kısım

Element	Series	unn. [wt.-%]	C norm. [wt.-%]	C Atom. [at.-%]	C Error [%]
Titanium	K-series	70.21	78.65	85.85	2.1
Iron	K-series	5.10	5.72	5.35	0.2
Niobium	L-series	13.96	15.64	8.80	0.5
Total:		89.27	100.00	100.00	

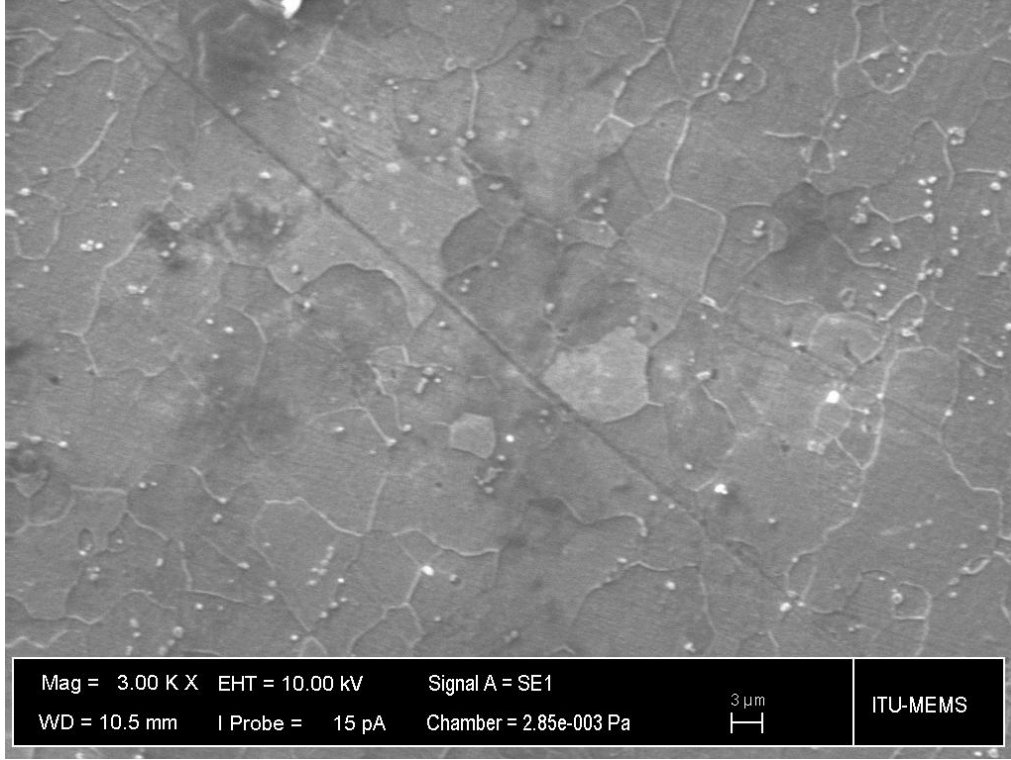
Şekil B.9 : EDX analizi sonrası bulunan Ti, Nb tanesi.



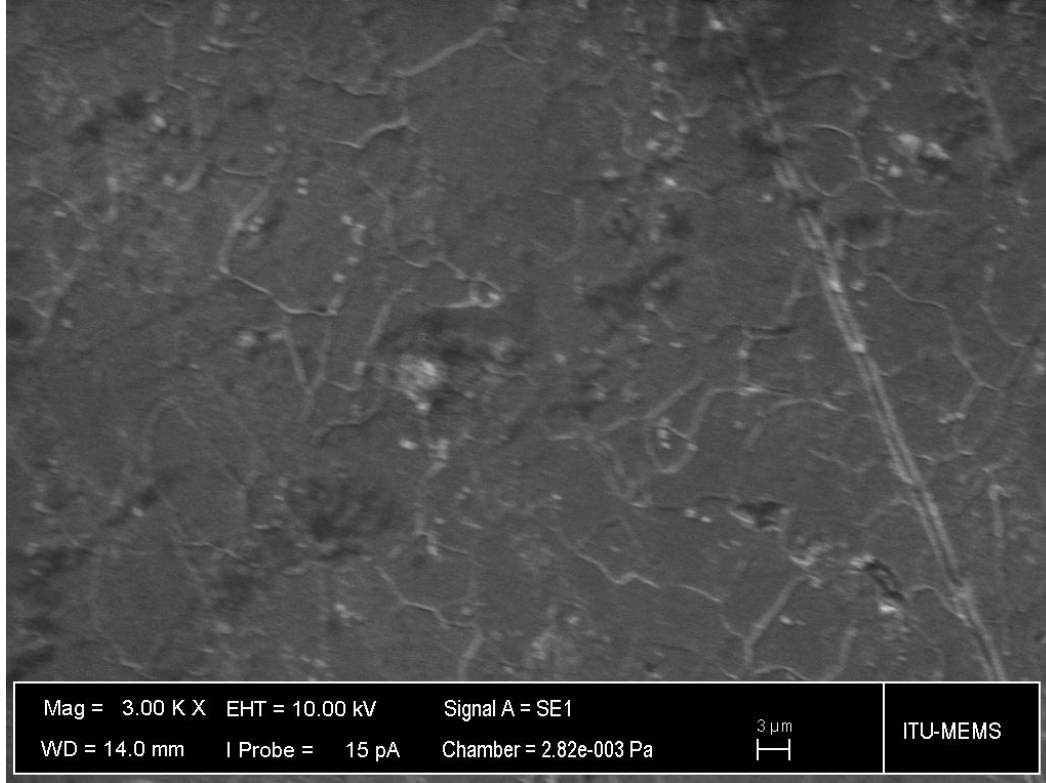
Şekil B.10 : 8 mikron çapında Ti, Nb, Mn, Al taneleri bulunan bölge.



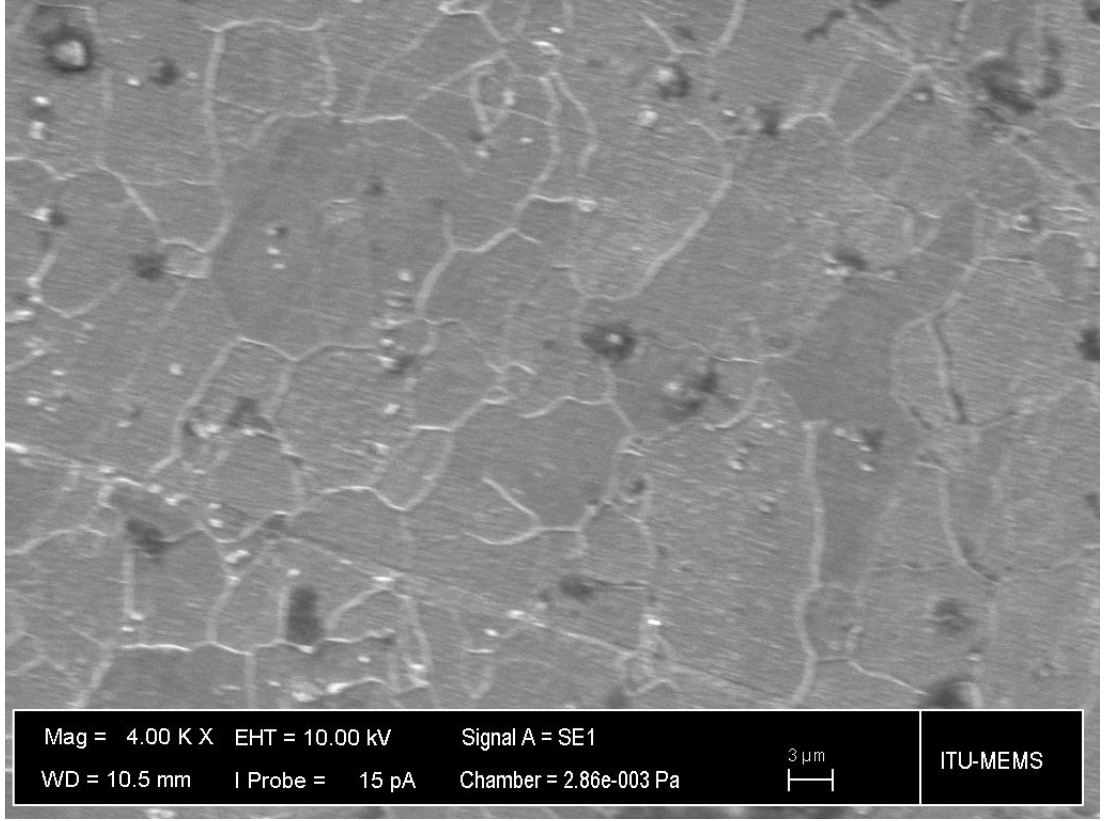
Şekil B.11 : EDX analizi sonrası bulunan Ti, Nb, Mn, Al taneleri.



Şekil B.12 : Kaynak bölgesi dışında malzemedeki yaklaşık 1 mikron çapında Ti taneleri bulunan bölge.

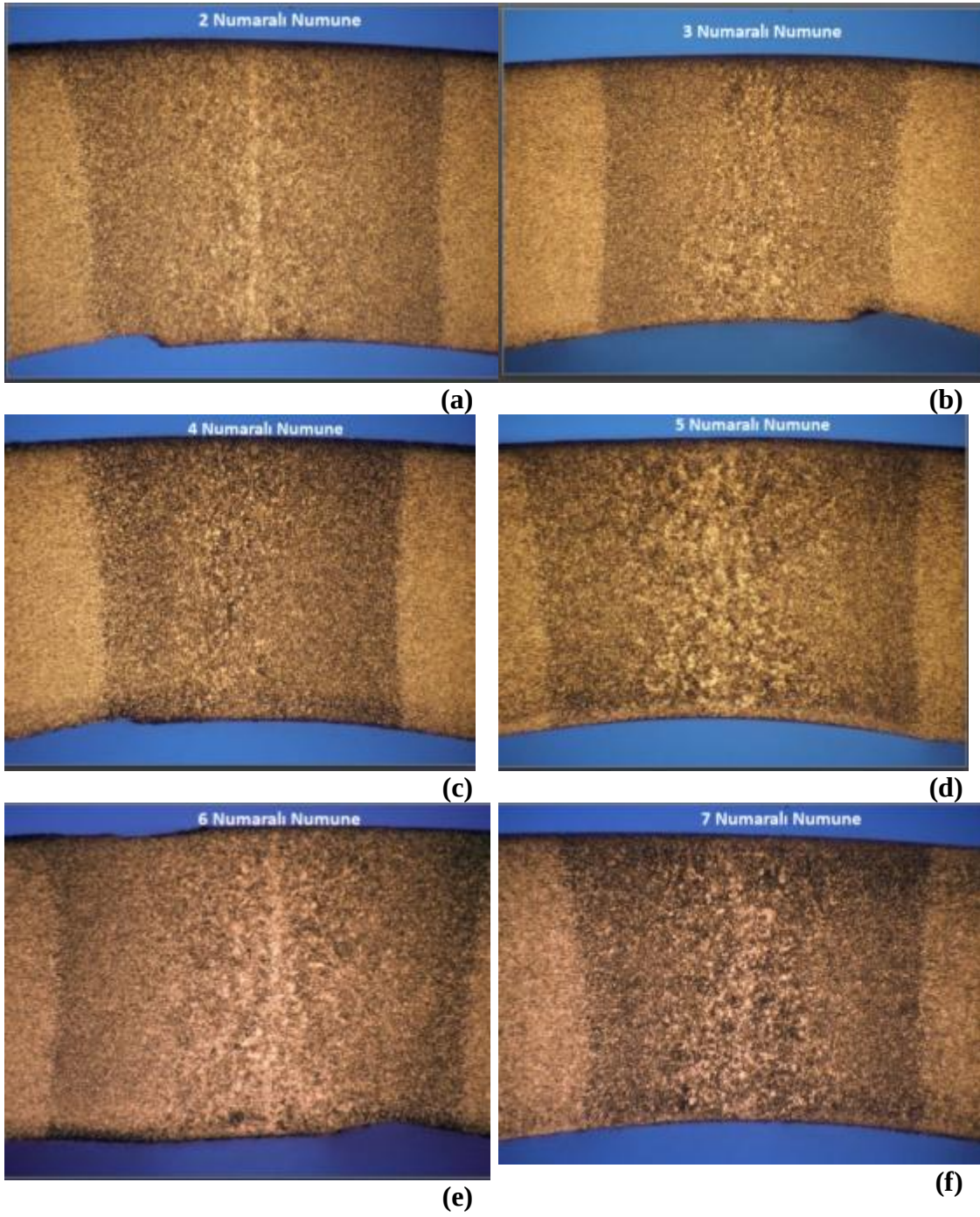


Şekil B.13 : Kaynak bölgesi dışında malzemedeki yaklaşık 1 mikron çapında Ti taneleri bulunan bölge.

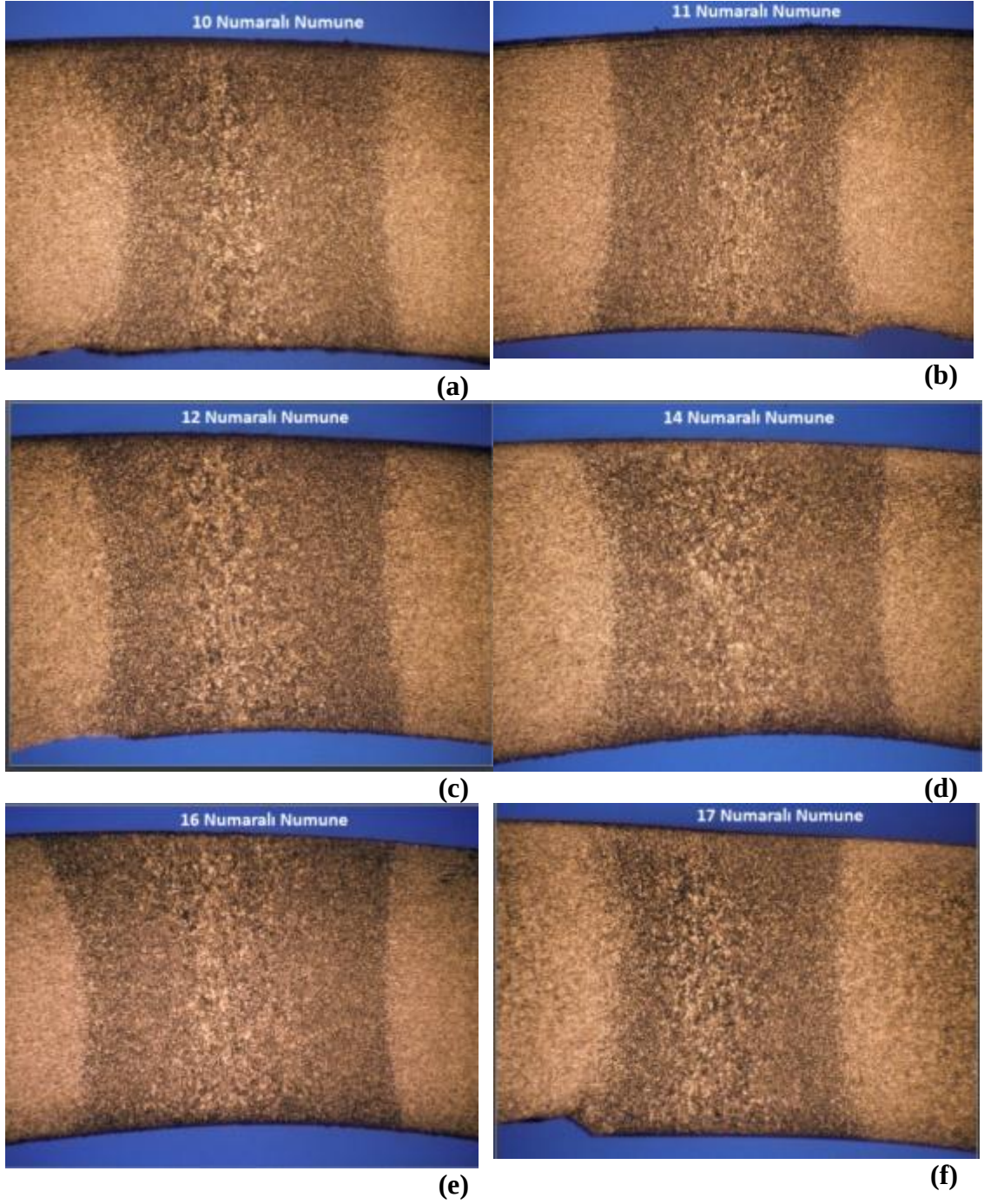


Şekil B.14 : Kaynak bölgesi dışında malzemedeki yaklaşık 2 mikron çapında Ti taneleri bulunan bölge.

EK C



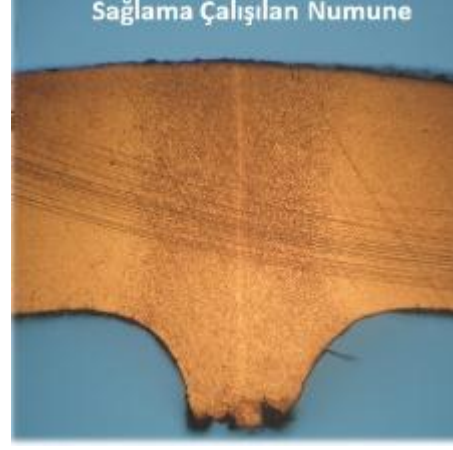
Şekil C.1 : Numunelerin metalografik görüntüleri: (a) 2 numaralı. (b) 3 numaralı. (c) 4 numaralı. (d) 5 numaralı. (e) 6 numaralı. (f) 7 numaralı.



Şekil C.2 : Numunelerin metalografik görüntüleri: (a) 10 numaralı. (b) 11 numaralı. (c) 12 numaralı. (d) 14 numaralı. (e) 16 numaralı. (f) 17 numaralı.



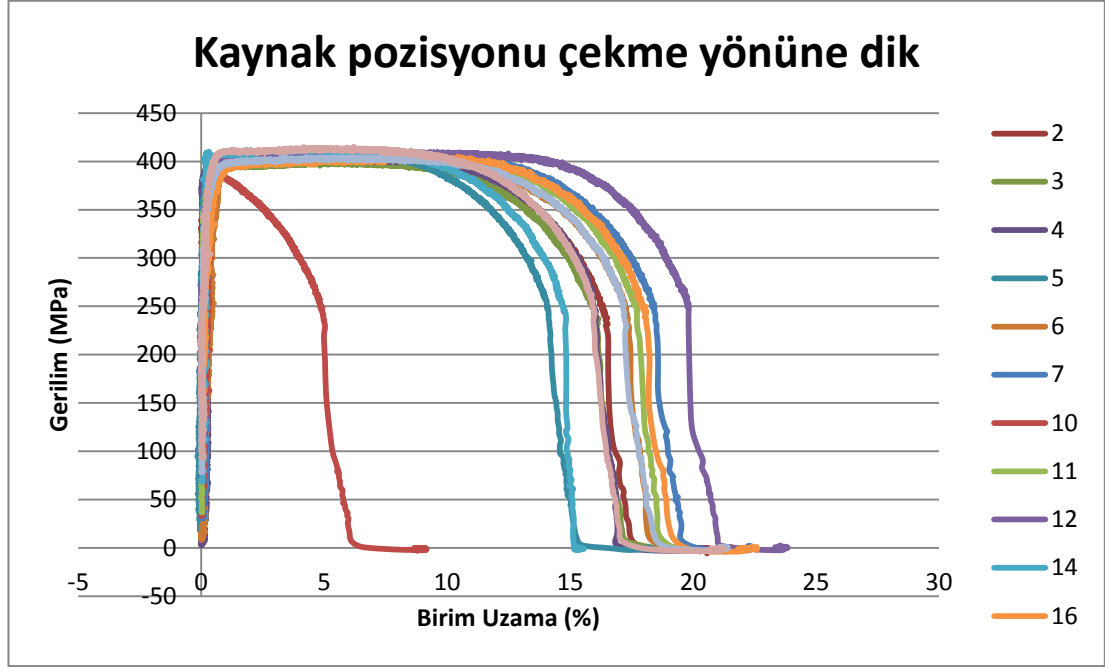
(a)



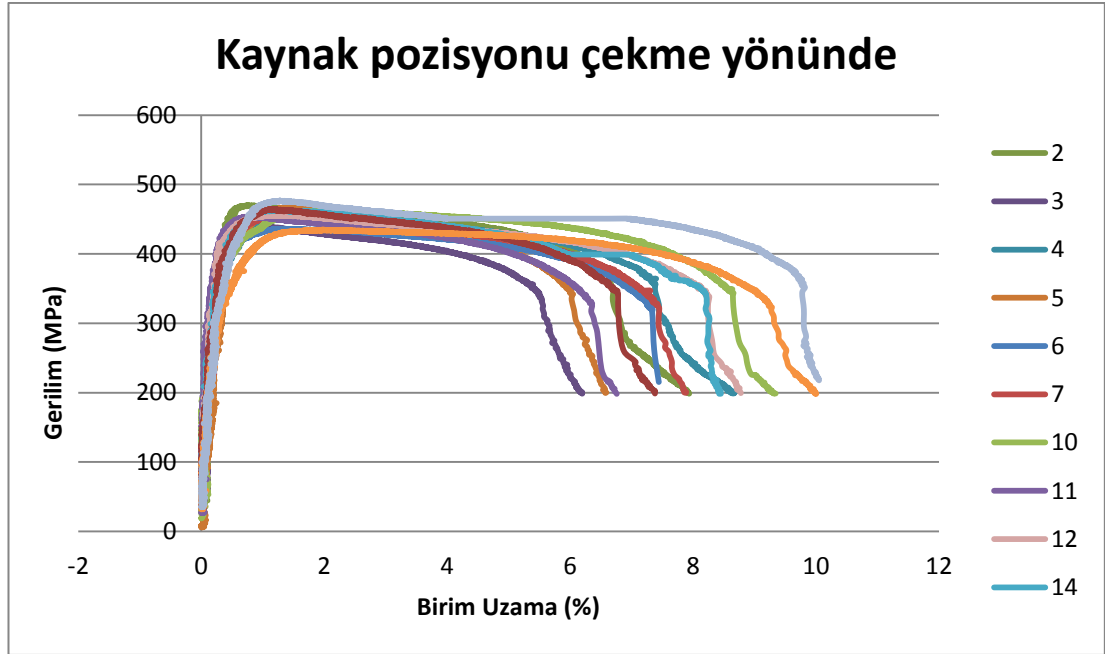
(b)

Şekil C.3 : Numunelerin metalografik görüntüleri: (a) 18 numaralı. (b) 19 numaralı.

EK D



Şekil D.1 : Kaynak pozisyonu çekme yönüne dik numunelerin çekme grafikleri.



Şekil D.2 : Kaynak pozisyonu çekme yönünde numunelerin çekme grafikleri.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ahmet Serdar Gündoğdu

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmir, 1986

E-Posta: aserdargun@yahoo.com.tr

Lisans: İTÜ Makina Mühendisliği

İTÜ Endüstri Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller: Boru Fabrikasında Üretim Mühendisliği (18 ay)