

KOCAELI ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE SPIRAL BORU
ÜRETİMİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN KAYNAK
DİKİŞ KALİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Mak. Y. Müh. Kahraman ŞİRİN

Anabilim Dalı: Makina

Danışman: Prof. Dr. Erdiñç KALUÇ

NİSAN 2004

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE SİRAL BORU ÜRETİMİNDE
KAYNAK PARAMETRELERİNİN KAYNAK DİKİŞ KALİTESİ
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Mak.Y.Müh. Kahraman ŞİRİN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 Ocak 2004

Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Mart 2004

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Erdiñç KALUÇ

(.....)

Üye
Prof.İbrahim UZMAN

(.....)

Üye
Doç.Dr.Hasan ALANYALI

(.....)

Üye
Doç.Dr. Muharrem YILMAZ

(.....)

Üye
Prof.Nurullah GÜLTEKİN

(.....)

NİSAN 2004

TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE SİRİAL BORU ÜRETİMİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN KAYNAK DİKİŞ KALİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Kahraman ŞİRİN

Anahtar Kelimeler: Spiral dikişli boru, Tozaltı kaynak parametreleri, Kaynak geometrisi, Kaynak tasarımı, Kaynak dikiş tokluğu

Özet: Tozaltı kaynak yöntemi ile üretilen spiral dikişli çelik borular, doğal gaz ve petrol iletim hatlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, özellikle yüksek işletme basınçları altında, doğal gaz hat borularının performansına yönelik kalite istemleri her geçen gün daha da artmaktadır. Kullanılan çelik malzemenin türü, malzeme kalınlığı, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri, kaynak telinin ve tozunun türü, ek kaynak metal miktarı, kaynak geometrisi, kaynak hızı ve kaynak parametreleri yüksek kaynak güvenilirliğinin sağlanması için göz önüne alınması gereken oldukça önemli faktörlerdir. Tüm bunlar, kaynak işlemi öncesi kaynak tasarım çalışmasının önemini ortaya çıkarmaktadır. Özellikle, doğal gaz ve petrol iletim hat borularının tozaltı kaynak yöntemi ile üretiminde, kaynak tasarımı oldukça önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışmada, öncelikle tozaltı kaynaklı spiral dikişli boru üretimi ile ilgili olarak oldukça kapsamlı bir teorik çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, tozaltı kaynağında kullanılan parametrelerden kaynak akım şiddeti, gerilim, tel çapı, kafa sayısı, kaynak ağzı biçimi ve kaynak hızı gibi kaynak değişkenlerinin kaynak dikiş geometrisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. İkinci aşamada ise kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve soğuma hızı gibi kaynak metalinin tokluk özelliklerini etkileyen faktörler ele alınmıştır. Daha sonra, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, üretim öncesi kaynak tasarımına yönelik olarak yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Sonuç olarak, olabilen en yüksek kaynak hızlarında yüksek kalite özelliklerinin elde edilmesine olanak sağlayacak şekilde kaynak parametrelerinin seçimine yönelik bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

THE EFFECT OF WELDING PARAMETERS ON WELD QUALITY IN THE SUBMERGED ARC WELDED SPIRAL PIPE PRODUCTION

Kahraman ŞİRİN

Keywords: Spiral pipe, Submerged arc welding parameters, Weld geometry, Weld design, Weld metal toughness

Abstract: Submerged arc welded spiral pipes are mainly used for the natural gas and petroleum transportation. However, expectations from the performance of the linepipes is greatly increasing especially under the high working pressures. Many factors such as type of base material, thickness, chemical composition of the weld metal, mechanical properties of the weld, type of the electrode and flux, amount of filler metal required, weld geometry, weld speed and welding parameters must be taken account to have high welding reliability. All these considerations bring up the necessity of the weld design in detail before welding operation is started. Especially, the weld design has a significant importance in the manufacturing of the spiral pipe, which is produced for the oil and gas transmission.

In this work, initially a very detailed literature review is carried about submerged arc welding process and spiral pipe production. As a first step of experimental work, the effect of welding parameters on the weld geometry is investigated by making different industrial experiments. Secondly, influencing factors like weld metal chemical composition and cooling time for toughness in weld seam are analyzed. Then, a new approach to weld design is specified for the production of submerged arc welded spiral linepipe. As a result, a computer program is developed to choose welding parameters to obtain the possible highest welding speed and high welding quality.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hem uygulamaya yarar getirmesi hem de üniversite-sanayi işbirliğinin gelişimine katkıda bulunması dileği ile tezimi yöneten, bilgi ve tecrübesiyle çalışmama ıvık tutan ve değerli yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sn.Prof.Dr. Erdinç KALUÇ 'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince, göstermiş olduğu teşvik ve yardımları için Fabrika Müdürüm Sn.İbrahim KALAFATOĞLU ve Sn.Erol AKGÜLLÜ 'ye, gösterdikleri destek dolayısıyla İmalat Müdürüm Sn. Hakan ÖZBAY 'ın şahsında tüm Mannesmann Boru Spiral Tesisi çalışanlarına ve tüm olanaklarından her zaman yararlandığım Kalite Kontrol Bölümü yönetici ve çalışanlarına da şükran borcumu belirtmek isterim.

Çalışmamın her aşamasındaki yardımları için sevgili eşim Araş.Gör.Mak.Y.Müh Şule Y. ŞİRİN 'e ve yaşamımda yer aldıkları için sevgili çocuklarım Faik ve Kaan Güray 'a kucak dolusu sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. Benimle her zaman gurur duyan sevgili anne ve babama da sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. TOZALTI KAYNAĞI VE SİRAL DİKİŞLİ BORU ÜRETİMİNDE KULLANIMI	9
2.1. Yöntemin Tanıtımı	9
2.1.1. Tozaltı kaynağında arkın oluşumu	10
2.1.2. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak makinaları	12
2.1.3. Tozaltı kaynağında akım türü ve kutuplama	14
2.1.4. Tozaltı kaynağında ark üflemesi ve önlenmesi	15
2.2. Tozaltı Kaynak Yönteminde Kullanılan Kaynak Parametreleri	16
2.2.1. Kaynak ağzı	16
2.2.2. Akım yoğunluğu	18
2.2.3. Kaynak akım şiddeti	18
2.2.3.1. Akım şiddeti ile tel ilerleme hızı arasındaki ilişki	19
2.2.4. Ark gerilimi	21
2.2.5. Kaynak hızı	22
2.2.6. Kaynak düzlemi ve elektrot açısı	26
2.2.7. Serbest tel uzunluğu ve elektrotlar arası uzaklık	28
2.3. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Sarf Malzemeleri	30
2.3.1. Kaynak tozları	30
2.3.1.1. Ergimiş tozlar	30
2.3.1.2. Karışık tozlar	31
2.3.1.3. Aglomere tozlar	31
2.3.1.4. Kaynak tozlarının kimyasal özellikleri	33
2.3.1.5. Kaynak tozlarının fiziksel özellikleri	39
2.3.2. Tozaltı kaynak telleri	41
2.4. Tozaltı Kaynağında Kaynak Metalurjisi	44
2.4.1. Kaynak bölgesinin içyapısı	45
2.4.2. Kaynak sırasında oluşan ısıl çevrimler	47
2.4.2.1. Isı girdisi	49

2.4.2.2.	Tepe sıcaklığı	50
2.4.2.3.	Soğuma hızı	51
2.4.2.4.	Karbon eşdeğeri	56
2.5.	Tozaltı Kaynağında Oluşan Kaynak Hataları	58
2.5.1.	Nufuziyet yetersizliği	58
2.5.2.	Yanma oluşu (çentik)	59
2.5.3.	Gözenek oluşumu	60
2.5.4.	Kalıntılar	62
2.5.5.	Çatlak oluşumu	63
2.5.5.1.	Sıcak çatlak oluşumu	63
2.5.5.2.	Soğuk çatlak oluşumu	65
2.5.5.3.	Gevrek kırılma	65
2.5.6.	Geometrik kaynak hataları	68
2.6.	Gaz Boru Hatlarında kullanılan çelikler	70
2.6.1.	Yüksek mukavemetli az alaşımlı çelikler	78
2.6.1.1.	Islah edilmemiş ince taneli yapı çelikleri	80
2.6.1.2.	Islah edilmiş ince taneli yapı çelikleri	80
2.6.1.3.	Termomekanik yöntem ile elde edilmiş ince taneli yapı çelikleri	81
2.6.2.	Gaz iletim hatlarında kullanılan çeliklerin özellikleri	81
2.6.3.	Çeliğin kimyasal bileşiminin kaynak dikişinin tokluk özellikleri üzerindeki etkisi	83
2.7.	Tozaltı Kaynağı İle Gaz iletim Hat Borusu Üretimi	89
2.7.1.	Spiral dikişli boru üretim yöntemi	89
2.7.2.	Boyuna dikişli boru üretim yöntemi	95
BÖLÜM 3.	ÇALIŞMANIN AMACI VE PLANLANMASI	98
3.1.	Çalışmanın Amacı	98
3.2.	DeneySEL Çalışmanın Planlanması	99
3.3.	Deney Ekipmanları ve DeneYlerin Yapılışı	101
BÖLÜM 4.	DENEYSSEL ÇALIŞMALAR VE DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	103
4.1.	Kaynak Parametrelerinin Kaynak Dikiş Geometrisi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi	103
4.1.1.	Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde tel yığıma miktarının belirlenmesi	126
4.1.1.1.	Dolgu alanının hesaplanması ile tel yığıma miktarının belirlenmesi	127

4.1.1.2.	Tel ilerleme hızlarının ölçümü ile tel yığma miktarının belirlenmesi	129
4.1.2.	Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde kaynak dikiş geometrisinin belirlenmesi	136
4.1.2.1.	Kaynak dikişinin geometrik büyüklüklerinin hesaplanması	137
4.1.2.2.	Kaynak dikişinin kep alanının hesaplanması	138
4.1.3.	Boyuna dikişli doğal gaz borularının incelenmesi	140
4.2.	Kaynak Dikişinin Tokluk Özelliklerini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi	143
4.2.1.	Kaynak metalinin kimyasal bileşiminin etkisinin incelenmesi	143
4.2.2.	Kaynak metalinin soğuma hızının etkisinin incelenmesi	151
4.2.3.	Dış kaynak dikişi IEB bölgesinin kaynak metalinin tokluk özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi	159
BÖLÜM 5.	TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE SİRAL DİKİŞLİ BORU ÜRETİMİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	162
5.1.	Tozaltı Kaynak Yöntemi İle Spiral dikişli Boru Üretiminde Kaynak Parametrelerinin Bilgisayar Programı ile Belirlenmesi	166
SONUÇLAR ve ÖNERİLER		169
EKLER		173
SİMGELER ve KISALTMALAR		193
ŞEKİLLER DİZİNİ		195
TABLolar DİZİNİ		198
KAYNAKLAR		200

GİRİŞ

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

Coğrafi konumu nedeni ile ülkemiz, zengin enerji kaynaklarına sahip doğu ülkeleri ile bu enerjiye ihtiyaç duyan batı ülkeleri arasında “enerji köprüsü” olarak yeni bir yer kazanmaktadır. 2004 yılı içinde işletmeye girmesi planlanan ve ulusal basınımda zaman zaman “bin yılın projesi” olarak adlandırılan Bakü-Tiflis-Ceyhan (BTC) boru hattının ülkemiz toprakları içinden geçmesi, Türkiye‘nin sahip olduğu bu avantajlı konumun en somut göstergelerinden birisidir. Ülkemiz sadece gaz boru hatlarının geçiş yeri olmayıp, aynı zamanda yıllık 600.000 ton toplam kurulu kapasitesi ile uluslararası standartlara uygun olarak spiral dikişli gaz borusu üretimini de gerçekleştirmektedir (Sakaryalı 2003).

Enerjinin maliyeti önemli bir oranda nakil maliyetine bağlı olması, boru hatlarında aynı çaplarda daha fazla gaz akışı sağlanması gereksinimini ortaya çıkarmakta bu da ancak, daha yüksek basınçlara çıkılması ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle, daha yüksek basınç, daha fazla gaz akışı yani daha ekonomik gaz nakli anlamına gelmektedir. Ekonomik nedenlerden dolayı, yüksek basınçlarda çalışma

gereksinimi ise beraberinde borunun mukavemeti ve/veya kalınlığındaki artışları da kaçınılmaz hale getirmektedir. Aynı zamanda, hattın güvenliği açısından gerek boru gövdesinde gerekse kaynak dikişinde özellikle düşük sıcaklıklarda oldukça yüksek tokluk özellikleri istenmektedir. Yüksek basınçlarda hattın dayanıklılığı sadece borunun et kalınlığına ve malzemenin yapısına değil, aynı zamanda kaynak dikişinin kalitesine de bağlıdır.

İnce kesitlerde yüksek mukavemet özelliklerine sahip olan ve kaynak edilebilirliği oldukça iyi olan ince taneli yapı çelikleri, gaz ve petrol iletim hatlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle %0,09 C ve %1,6 'ya kadar Mn içeren, çoğunlukla Nb ve gerekiyorsa Ti ya da V eklenmesiyle alaşımlandırılan ve karbon eşdeğeri IIW 'ye göre 0,32 'ye kadar çıkabilen bu çeliklerin -20 °C'de tokluk değerleri 200 J düzeyindedir. Öte yandan, servis sırasında boru hattının kısa süreli de olsa korozif nitelikteki gaz ya da ham petrol nakli için kullanımı söz konusu ise, HIC (Hydrogen Induced Cracking) testleri gerek çelik üreticileri gerekse boru üreticileri için önemli bir kabul koşulu haline gelmektedir. Bu amaçla kullanılan çelikler, tokluk özelliği yüksek, sertleşebilme özelliği düşük ve HIC dayanımı oldukça fazla olan çeliklerdir. Termomekanik haddeleme yöntemi ile elde edilen bu tür çelikler kalıntı ve çökeltilerden arındırılmış, oldukça düşük miktarda karbon (< 0,05%), mangan ve kükürt içeriğine sahiptirler.

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

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

Bu düşünceden yola çıkarak, bu çalışmada özellikle yüksek basınçlara maruz doğal gaz hat borularının tozaltı kaynak yöntemi ile üretiminde olabilen en yüksek kaynak hızlarında, yüksek kalite özelliklerinin elde edilmesine olanak sağlayacak bir şekilde kaynak parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, öncelikle oldukça kapsamlı bir teorik çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, kaynak parametrelerinin kaynak dikişi üzerindeki etkileri incelenmiş ikinci aşamada ise kaynak dikişinin tokluk özelliklerini etkileyen faktörler ele alınmıştır.

Kaynak dikişinin metalografik incelemesi amacı ile yapılan çalışmalarda, kaynak kafaları belirli bir sıra ile devre dışı bırakılarak kaynak dikişinin oluşumunun her bir aşaması ayrı ayrı belirlenmiştir. Daha sonra, bilgisayar yardımı ile elde edilen ölçekli kaynak görüntüleri üzerinden geometrik ölçümler yapılarak, kaynağın her bir aşamasındaki kaynak dikişinin kesit alanı, kaynak kepi kesit alanı, toplam dolgu alanı, kaynak dikişinin genişliği, yüksekliği ve nüfuziyet derinliği belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarının ilk aşamasında, öncelikle 1016x17,7 mm ebatlı boruda 1.80 m/dk'lık kaynak hızında kaynak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, tüm diğer parametreler sabit tutularak, kaynak hızı önce 1.50 m/dk ve

sonrasında da 1.20 m/dk değerine düşürülerek elde edilen kaynak dikişi geometrik incelemeye tabi tutulmuştur. Tüm diğer parametrelerin sabit tutulması durumunda, kaynak hızının azaltılması yani ısı girdisinin artırılması ile kaynak dikişi nufuziyetinin, genişliğinin, yüksekliğinin ve kaynak dikiş kesitinin arttığı görülmüştür. Deneylerin ikinci aşamasında, 914x11,1 mm ebatlı boruda kaynak hızı sabit kalacak şekilde iç kaynaktaki kafa sayısı ve elektriksel kaynak parametreleri değiştirilerek kaynak gerçekleştirilmiştir. İki kafa kullanımında, elde edilen dikişin kesit alanının öncekine göre biraz daha küçük olmasına karşın, her iki dikişinde gaz borusundan istenen kalite özelliklerini sağlayacak durumda olduğu saptanmıştır. Üçüncü aşamada, 1067x14,27 mm ebatlı boru, iç kaynaktaki üç dış kaynaktaki ise iki kafa kullanımı ile 1.50 m/dk 'lık kaynak hızı ile kaynak edilmiştir. Daha sonra, kaynak hızı 1.50 m/dk 'dan 1.65 m/dk 'ya çıkarılmış ve elektriksel kaynak parametreleri, kafa sayıları aynı kalacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Üçüncü adımda, iç kaynaktaki kafa sayısı azaltılarak ikiye düşürülmüş ve kaynak hızı 1.40 m/dk olarak değiştirilmiştir. Bu gruptaki son deneysel çalışmada ise, iç kaynak noktasının yeri değiştirilmiş ve her iki durumda elde edilen iç kaynak dikişi geometrik açıdan incelenmiştir. İç kaynak noktasının yerinin değişimi ile kaynak dikiş genişliğinin ve nufuziyet derinliğinin de değiştiği görülmüştür.

1422x12,5 mm ebatlı boruda ise gaz borusu üretimi için 2,30 m/dk gibi oldukça yüksek sayılabilecek kaynak hızı denenmiş ve bu hız ile kaynak edilebilirliğin olanaklı olduğu görülmüştür. Seri üretim durumunda mekanik ve elektriksel olarak ele alınan parametrelerde oluşan salınımların kaynak dikiş geometrisinde yarattığı değişimleri görebilmek için 1067x10,31 mm ebatlı bir borunun beş farklı bölgesinden alınan numuneler geometrik olarak incelenmiştir. Sürekli üretim durumunda, tüm parametrelerin aynı kalmasına karşın kaynak ağzı biçimindeki değişimler, kaynak hızı, kaynak akımı ve ark gerilimindeki ve tel ilerleme hızındaki küçük değişimler sonucunda ergime kesit alanında yaklaşık %6 dolaylarında bir değişim olduğu görülmüştür. 1016x8,8 mm ebatlı boruda enerji girdisi aynı kalacak şekilde elektriksel kaynak parametreleri ve kaynak hızı değiştirilerek bu koşullar altında elde edilen kaynak dikişi incelenmiştir.

Burada; iç kaynak, sürekli olarak aynı elektriksel kaynak parametreleri ile yapılırken, yalnız dış kaynak parametreleri değiştirilmiştir. Dış kaynaktaki enerji girdisi yaklaşık 1087 J/mm olacak şekilde, önce 1,65 m/dk ve daha sonra 2.60 m/dk kaynak hızı ile kaynak işlemi yapılmıştır. Enerji girdisinin aynı olmasına karşın, kaynak hızının azalması ile birlikte ergimeye iştirak eden esas metal miktarı arttığı için kaynak dikiş kesit alanının diğerine göre büyüdüğü görülmektedir. Ayrıca, akım seviyelerinin farklı olması nedeni ile dolgu metali ile esas metalin karışım oranları da farklıdır. Karışım oranındaki bu farklılık ise, kaynak metalinin kimyasal bileşiminde de bazı farklılıkların oluşmasına neden olacaktır. Kaynak banyosuna iletilen toplam akım miktarının DC ve AC kafalarda ki dağılımı ile her bir kafadaki akım şiddeti seviyesi oldukça önemlidir. Yapılan deneysel çalışmalarda, toplam akım miktarının aynı olmasına karşın, akımın DC ve AC kafalardaki dağılımına göre ergiyen tel miktarının ve dolayısıyla dikiş geometrisinin değiştiği saptanmıştır. Ayrıca, su ve kazık boruları gibi kaynak dikişinde X-Ray kontrolünün gerekli olmadığı borularda, 3.00 m/dk gibi yüksek kaynak hızlarına çıkılabileceği görülmüştür.

Söz konusu bu deneyler göstermektedir ki, kaynak hızı ve enerji girdisini sabit tutacak şekilde kullanılan kafa sayısını değiştirme olanağı vardır; ancak kafa sayısının azaltılması halinde, enerji girdisinin aynı kalması için, her bir kafaya yüklenen akım seviyesinin yükseltilmesi gerekir. Tüm bunların sonucunda, iyi bir kaynak dikişinin elde edilebilmesi ve yüksek kaynak hızlarına çıkılabilmesi için kaynak hızı, iletilen toplam akım miktarı, kullanılan kafa sayısı, her bir kafaya yüklenen akım miktarı ve akımın DC ve AC kafalardaki dağılımı arasında uygun bir dengenin kurulması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Söz konusu bu dengenin kurulabilmesi ise, beraberinde kaynak tasarım çalışmasını da getirmektedir. Bu nedenle, yukarıda kısaca açıklanan deneyler göz önüne alınarak, öncelikle malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilecek olan kaynak dikişinin geometrisini belirlemeye yönelik ölçütler oluşturulmuştur. Daha sonrasında da tel ergime miktarının hesaplanmasına yardımcı olan formüller incelenmiştir. Spiral dikişli boru kaynağında, dikiş geometrisi denilince dikiş yüksekliği, dikiş genişliği, nufuziyet derinliği, kaynak metali kesit alanı, kaynak kepi kesit alanı ile iç ve dış

dikişin birbirlerine olan işlerliği gibi kavramlar düşünülmektedir. Yapılan teorik çalışmada, her ne kadar kaynak dikiş geometrisine ait büyüklüklerle ilgili olarak bazı oranların verildiği görülse de, özellikle malzeme kalınlığına bağlı olarak ideal dikiş geometrisini veren herhangi bir bilgiye rastlanılamamıştır. Kaynak kepinin bir daire parçası olarak düşünülmesi durumunda, malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak dikiş yüksekliğinin, genişliğinin ve kaynak kep alanının kolaylıkla hesaplanabilir olduğu görülmüştür. Yapılmış olan tüm deneylerde iç ve dış kaynak dikişlerinin geometrik ölçümleri yapıldıktan sonra, ölçülen kep alanları teorik olarak elde edilen değerlerle kıyaslanmış, gözlenen en büyük sapma %6,3 olmuştur.

Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, kaynak parametrelerine bağlı olarak tel ilerleme hızının bilinmesi dolgu malzemesi yığıma hızını hesaplarken çok önemli bir temel oluşturur. Son yıllarda, Chandel ve Tusek tarafından matematiksel modelleme yolu ile yapılan çalışmaların sonucunda, tozaltı kaynak yönteminde DC(+), DC(-) ve AC akım türleri için akım şiddeti ile tel ergime hızı arasındaki ilişki formüle edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen tel yığıma miktarları Chandel ve Tusek tarafından geliştirilmiş olan formüllerden elde edilen değerlerle kıyaslanmıştır. Ayrıca, üç farklı üretimde tel ilerleme hızları ölçülerek, elde edilen değerler bir kez daha Chandel ve Tusek formüllerinden çıkan değerlerle kıyaslanmıştır. Ölçüm sonuçlarına teorik açıdan en yakın değerleri Chandel tarafından geliştirilmiş olan formüllerin verdiği görülmüş, en büyük sapmanın %8 olduğu ortaya çıkmıştır.

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde ise kaynak dikişinin çentik darbe mukavemetine etki eden faktörlerin saptanması amacı bir dizi deney yapılmıştır. Deneylerde, sürekli döküm yolu ile üretilmiş ve termomekanik haddelemeye tabi tutulmuş, hidrojen kırılma hızına karşı yüksek dirençli bir ince taneli yüksek mukavemetli X-65 boru çeliği kullanılmıştır. Öncelikle, kaynak metalinin kimyasal bileşiminin kaynak dikiş tokluk özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, ilk aşamada 864x8,74 mm ebatlı boruda iç ve dışta tandem kaynak yapılmış tüm kafalarda S2Mo türü kaynak teli kullanılmıştır.

İkinci aşamada, tüm parametreler aynı tutulurken sadece kaynak tellerinin türü değiştirilmiş ve Mn içeriği daha fazla olan S3Mo teli kullanılarak çentik darbe tokluğunda artış hedeflenmiştir. Üçüncü aşamada ise, kaynak telleri bir kez daha değiştirilmiştir. İç ve dış kaynakta DC kafalara S3MoTiB tipi tel takılırken AC kafalarda ise S2Mo cinsi tel kullanılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise, diğer tüm parametreler aynı kalırken, daha önce kullanılan malzemeden farklı olarak C içeriği daha az buna karşın Mn ve Mo içeriği daha yüksek olan ve mikro alaşımlama elementi olarak Nb ve V 'un yanı sıra Ti 'da bulunduğu bir X-65 boru çeliği kullanılmıştır. Kaynak dikişindeki Mn miktarının artması ile tokluk değerlerinde de artış olduğu saptanmıştır. Mn artışının yanında kaynak metalindeki Ti miktarının artması tokluk özelliklerini daha da iyileştirmiştir.

Bilindiği gibi, soğuma hızına etki eden başlıca faktörler esas metalin kaynak öncesi sıcaklığı, uygulanan enerji girdisi ve malzeme kalınlığıdır. Bu faktörlerden ana metalin başlangıç sıcaklığının etkisini görebilmek için 1067x11,91 mm ebatlı boruda bir dizi deney yapılmıştır. Öncelikle, iç ve dış kaynağın soğuma hızı aynı olacak şekilde elektriksel kaynak parametreleri ve kaynak hızı değiştirilmiştir. Burada, elektriksel kaynak parametreleri farklı olmasına karşın, 1,20 m/dk, 1,50 m/dk ve 2.00 m/dk kaynak hızlarında elde edilen kaynak dikişinin -20 °C 'de çentik darbe mukavemetlerinin birbirlerine çok yakın değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise, uygulanan enerji girdisinin aynı olmasıdır.

Ancak, enerji girdisi tek başına belirleyici bir faktör olmayıp, aynı enerji girdisinde ancak, farklı kaynak öncesi sıcaklıklarında daha farklı çentik darbe mukavemet sonuçları elde edilebilir. Bu amaçla, yapılan bir diğer deneyde, 2.00 m/dk kaynak hızındaki tüm parametreler sabit tutulmuş ve iç kaynak sonrası makina yaklaşık 30 dakika süreyle durdurularak, dış kaynak öncesi malzeme sıcaklığının 10 °C 'ye kadar düşmesi sağlanmıştır. Böylece, daha hızlı bir soğumanın gerçekleşmesi ile birlikte, kaynak dikişinin -20 °C 'de çentik darbe mukavemeti yükselmiş, buna karşın dış kaynağın IEB bölgesinin sertliği artmıştır. Ayrıca, daha soğuk bölgede kaynak yapıldığı için, dış kaynağın kesit alanı azalmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise elektriksel kaynak parametreleri sabit

tutulurken dış kaynak noktasının yeri değiştirilerek, dış kaynağın daha hızlı soğuması sağlanarak benzer sonuçlar elde edilmiştir. Son aşamada ise, 1067x15,88 mm ebatlı boruda dış kaynak dikişinin IEB bölgesinin kaynak metalinin çentik darbe mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, öncelikle sadece iç kaynak bölgesini ve daha sonra sadece dış kaynak bölgesini içerecek şekilde çentik darbe deney parçaları hazırlanmıştır. İç ve dış kaynağın sonuçlarının birbirine son derece yakın olduğu görülmüştür. Son aşamada ise, kaynak dikişinin tam orta bölgesini içerecek şekilde çentik darbe deney parçaları hazırlanmıştır. Söz konusu bu orta bölgenin çentik darbe mukavemetinin, iç ve dış kaynağa karşı daha az olduğu saptanmıştır.

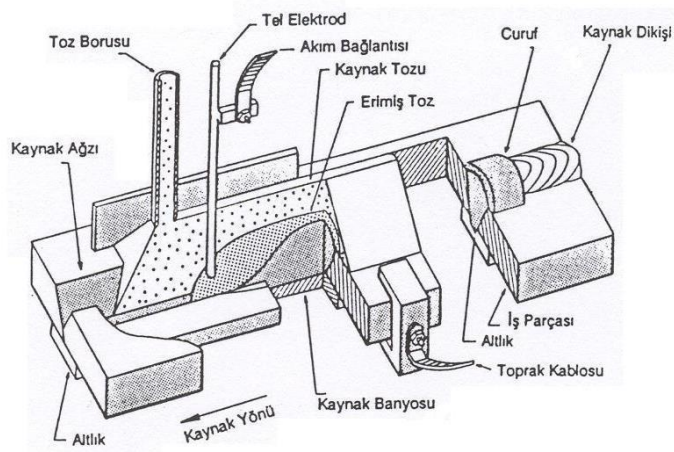
Yapılmış olan deneysel çalışmalardan da görülmüştür ki, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, kaynak dikiş kalitesi üzerinde oldukça etkili olan kaynak parametrelerinin iyi bilinmesi ve kontrol altında tutulması yüksek kaynak güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Yüksek basınçlara güvenle cevap verebilecek kalite seviyesini yakalayabilmek ve aynı zamanda yüksek üretim hızlarına ulaşabilmek için söz konusu bu parametrelerin uygun bir şekilde bir araya getirilmesi gereklidir.

Kaynak akımı, kaynak gerilimi, kaynak ağzı biçimi, tel çapı, kafa sayısı, akım cinsi ve kaynak hızı gibi kaynak parametrelerinin seçiminin belirli ölçütlerin ışığı altında ve belirli bir yöntem altında yapılması, hatasız ve güvenilir bir kaynak bağlantısı için zorunludur. Bu yöntemi ana hatlarıyla, malzeme kalınlığı ve üretim standardına göre elde edilmek istenen kaynak dikişinin geometrik boyutlarının öngörülmesi, daha sonra bu dikişi elde edebilmek için gereksinim duyulan tel miktarının belirlenmesi ve bu belirlenen telin kaynak noktasına sevk edilmesi şeklinde özetlemek olanağı vardır. Tüm bu konuların göz önüne alınması ile tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, üretim öncesi en uygun kaynak parametrelerinin seçimine olanak sağlayan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

2. BÖLÜM. TOZALTI KAYNAĞI VE SİRAL DİKİŞLİ BORU ÜRETİMİNDE KULLANIMI

2.1. Yöntemin Tanıtımı

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



Şekil 2.1. Tozaltı kaynak yönteminin şematik görünümü (Anık 1991b).

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

2.1.1. Tozaltı kaynağında arkin oluşumu

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

Burada, “iyonlaşma” adı verilen elektro-kimyasal olay ile bu noktanın hemen civarındaki havayı elektriksel açıdan iletken kılan metalik buharlar oluşur. Elektrotun parçadan birkaç milimetre geriye çekilmesi durumunda, akım birinden diğerine yani elektrottan parçaya iletken hale gelmiş hava üzerinden geçer ve ark oluşur. Oluşan ark kendisini ışık ve ısı biçiminde belli eder. Daha sonra, elektrotun ucu damlacıklar halinde ergir ve oluşan damlacıklar ark tarafından ısınmış olan iş parçasındaki bölgeye geçer. Arkin temas ettiği noktada, parça yüzeyinde yerel olarak bir ergimiş metal banyosu oluşur, yani kaynak ile birleştirme oluşur (Oğuz 1975). Ark yardımıyla ergiyen elektrot metalinin kaynak banyosuna geçişi üç farklı şekilde olur; spreylenmiş şekilde geçiş ki, burada metal

damlaları arkın içinden ince damlalar halinde geçer. Küresel geçiş, iri damlalar şeklinde olup geçiş hızı öncekine göre daha yavaştır. Kısa devreli geçişte ise, elektrot ucundan kopan damla iş parçasına değer ve kısa devre oluşturur daha sonra koparak ergimiş banyoya geçer.

Kaliteli bir kaynak dikişi için, kaynak süresince sabit güçte diğer bir deyişle, sabit akım ve gerilim değerlerinde kararlı olarak yanan bir arkın bulunması gerekir. Bunun için, akım üretici-kaynak makinası ile kaynak arkının uyum içinde olmaları gereklidir. Zira kaynak işleminde kaynak makinası ile kaynak arkı ortak bir elektriksel çevrimde bulunurlar ve kaynak işlemini birlikte gerçekleştirirler. Dolayısıyla, kaynak işleminde harcanan enerji açısından kaynak makinası üretici (arz eden), kaynak arkı ise tüketici (talep eden) durumundadır. İyi bir kaynak dikişi için, yani; kararlı bir ark için kaynak işlemi süresince enerji üreticisi ile tüketicisi arasında bir arz-talep dengesinin oluşması gerekir. Kaynak makinası ile ark arasındaki arz talep dengesi demek, bunların ortak bir noktada çalışmasıdır. Kaynak işlemi sadece bu noktada gerçekleşir (Karadeniz ve Günay 1999).

Kaynak makinalarında, makinayı karakterize eden ve makinanın gerilim-akım arasındaki bağıntısını veren eğriler mevcut olup, bu eğrilere statik karakteristik eğrileri adı verilir. Aynı şekilde, arkı karakterize eden ve ark gerilimi ile akım arasındaki bağıntıyı veren ark statik karakteristiği vardır. Söz konusu ortak çalışma noktası, kaynak makinası ile arkın statik karakteristiklerinin kesim noktasıdır. Kaynak işleminin özelliği nedeniyle, özellikle damla geçişi sırasında ark boyu sürekli olarak değişir ve bu nedenle kaynak işlemi boyunca ortak noktada sürekli olarak çalışamaz. Ark boyu, ideal ark boyu çevresinde belirli bir bölge içinde değiştiği sürece ark çalışma noktası civarında kararlı olarak yanar ve sönmez. Arkın kararlı olarak yandığı bu bölgeye ark karakteristikleri bölgesi adı verilir. Eğer bu bölge dışına çıkılırsa ark söner ve kaynak kesintiye uğrar. Kaynak işlemi boyunca, adı geçen bu ortak çalışma noktası ve yakın çevresindeki çalışma ne kadar fazla ise kaynak dikişi de o kadar kaliteli ve ekonomik olur. Bu ise doğrudan kullanılan kaynak makinasının özellikleri ile ilgilidir.

2.1.2. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak makinaları

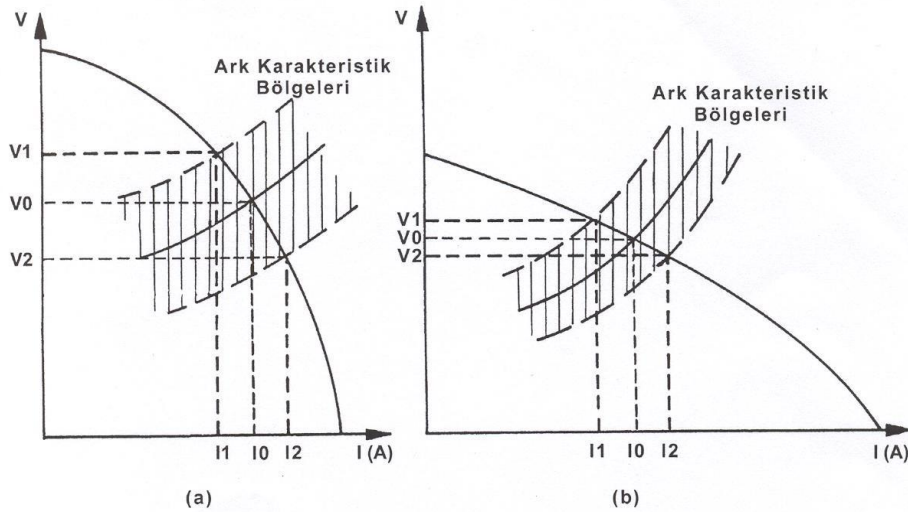
Elektrik ark kaynağını hem doğru akım hem de alternatif akım ile yapabilme olanağı bulunduğundan, kaynak makinaları da DC akım üretici (jeneratör ve redresör) ve AC akım üretici (transformatör) olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Kaynak jeneratörleri, bir kuvvet makinası (benzin-dizel-elektrik motoru)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

- 1.** Şebeke tarafından besleniyorsa, şebeke gerilimini sınırlandırılmış boşa çalışma gerilimine çevirebilmelidir,
- 2.** Kaynak akım şiddeti ayar donanımına sahip olabilmeli ve çalışma sırasında ayarlanmış kaynak akım şiddetini sabit tutabilmelidir,
- 3.** Boşa çalışma gerilimi ayarına sahip olabilmelidir,
- 4.** Çalışma başladığında ark meydana gelince boşa çalışma gerilimini olabilen en kısa zaman dilimi içinde ark gerilimine düşürebilmelidir,
- 5.** Çalışma anında kararlı bir ark oluşturmalı ve bunun sürekliliğini sağlamalıdır.

Yukarıda belirtilen bu özelliklerin gerçekleşmesinden akım üreticinin statik ve dinamik karakteristikleri sorumludur. Söz konusu bu elektrikselsel karakteristikler, makinanın seçilmiş kaynak yöntemi için uygunluğunun en önemli göstergeleridir. Statik karakteristik, statik çalışmada yani sürekli ark durumunda, makinanın akım

şiddeti ile gerilimi arasındaki bağıntıyı yani, gerilime bağlı olarak akımdaki değişmeyi verir. Dinamik karakteristik ise, çalışma sırasındaki ani yük değişimlerine karşı makinanın davranışdır. Diğer bir deyişle, akım ile gerilimin kısa zaman aralığındaki değişimini ifade eden karakteristiktir.

Sabit akım prensibine göre çalışan, düşey karakteristikli akım üreteçlerinde ark geriliminin önemli bir büyüklükte düşmesine karşın akım şiddetindeki değişim çok azdır (Şekil 2.2-a). Bu nedenle, ark boyunca bir değişim olduğu zaman ergime gücündeki değişim çok azdır ve bu da düzgün bir kaynak dikişinin elde edilmesi için çok önemli bir üstünlüktür. Sabit akımlı üreteçler, hem AC hem de DC türü akım üretebilme yeteneğine sahiptirler. Sabit akımlı güç üretici kullanıldığında, otomatik bir gerilim algılama kontrol sistemine gerek vardır. Bu da ancak, gerilim duyarlı (değişken hızlı) tel sürme kontrol sistemi ile olasıdır. Bu kontrol sistemi ile ark gerilimindeki değişimler sürekli olarak algılanır ve ark boyunu sabit tutabilmek için tel sürme hızı sürekli olarak değiştirilir. Yani, ark boyunu sabit tutabilmek için tel hızı sürekli olarak ayarlanır. Eğer, gerilim değeri ayar değerinin üstüne çıkarsa tel hızı artırılmakta, gerilim değeri ayar değerinin altına düşerse tel hızı azaltılmaktadır. Gerilim duyarlı tel sürme sistemleri akım yoğunluğunun 59 A/mm^2 'den daha az olduğu kaynak uygulamalarında başarılı sonuçlar vermektedir.



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

Sistemin ayar hızı, ince tellerin kullanıldığı yani, yüksek tel ilerleme hızının söz konusu olduğu kaynak uygulamalarında, kararlı bir ark oluşturmak için yetersiz kalmaktadır. Genellikle, 2,5 mm 'den daha kalın çaplı tel kullanımının söz konusu olduğu otomatik kaynak sistemleri ve tozaltı kaynak yönteminde oldukça uygun sonuçlar vermektedir (ASM Handbook Committee 1983).

Yatay karakteristikli akım üreteçlerinde (sabit gerilimli) kaynak makinasının verebileceği minimum ve maksimum akım şiddetleri ile sınırlandırılmış bir çalışma bölgesi bulunur ve bu bölgeye akım ayar alanı adı verilir. Yatay karakteristikli kaynak akım üreteçlerinde ark geriliminin (ark boyunun) az bir miktardaki değişimine karşın akım şiddetindeki yani ergime gücündeki değişim çok daha fazladır (Şekil 2.2-b). Sadece, DC akım üretebilen sabit gerilimli güç üniteleri, sabit hızlı tel sürme sistemleri ile birlikte kullanıldığında, kaynak işlemi boyunca gerilimin hemen hemen sabit kalmasını sağlarlar. Burada, güç kaynağı akım ne olursa olsun seçilmiş olan ark gerilimine göre çalışır. Tel sürme motoru seçilmiş sabit bir devirde döner yani tel hızı sabittir. Ark boyundaki değişimler kaynak akımının arttırma ve azalma gibi ani değişimleri ile dengelenir (Eryürek 1998). Normal kaynak koşulları sırasında herhangi bir nedenle ark boyunun uzaması sonucunda, akım şiddeti ve buna bağlı olarak tel ergime miktarı belirli bir oranda azalır. Ancak, tel sürme sabit hızla devam ettiği için telin ucu iş parçasına doğru ilk ark uzunluğunu elde edinceye kadar yaklaşır. Sonuç olarak, ark normal boyuna dönerken serbest tel uzunluğu artar ve akım şiddeti belirli bir oranda azalır. Ark boyunun kısalması durumunda ise bunun tam tersi olur. Akım yoğunluğunun 59 A/mm^2 'den daha fazla olduğu ince çaplı ve yüksek hızlı tel kullanımının söz konusu olduğu kaynak yöntemlerinde, yüksek hızlı akım değişimleri için yatay karakteristikli güç kaynağı kullanımı zorunludur.

2.1.3. Tozaltı kaynağında akım türü ve kutuplama

Tozaltı kaynağında hem doğru akım (DC) hem de alternatif akım (AC) kullanılmakta olup, DC akımda negatif ya da pozitif kutuplama yapma olanağı vardır. DC (+) kutuplama da yüksek nüfuziyet elde edilirken, yüksek kaynak

hızlarında çalışma olanağı da doğar. Ayrıca, gözenek oluşumuna karşı direnç yükselir. DC (-) kutuplamada ise ergime gücü artarken (%30) nufuziyet azalır. Alternatif akımla kaynakta tutuşma özelliği iyi değildir, buna karşın ark üfleme yoktur, ark daha sakin yanar. Dolayısıyla, yanma oluşu tehlikesi azalır. Birden fazla kaynak kafası kullanımında birbirine yakın birden fazla arkın üfleme problemi, ilk ark oluşumunun DC diğerlerinin AC olarak seçilmesi ile ortadan kaldırılabılır. İlk ark oluşumunda nufuziyet ana etken olduğu için yüksek akım şiddeti ve dolayısıyla büyük çaplı kaynak teli kullanılır. İkinci ve üçüncü ark oluşumlarında akım şiddeti, kaynak dikiş biçimi ve yapısına göre ayarlanır, tel çapları ise ilk kafadaki tel çapından daha küçük seçilir.

Endüstride maliyetlerin düşürülmesinin ön plana çıkması ile tozaltı kaynağında birden fazla kafa kullanımı ön plana çıkmıştır. Çift kafa (tandem) ya da üç kafa kullanımı ile kaynak banyosuna daha fazla akım iletebilme olanağı vardır. Böylelikle, ergime hızı ve buna bağlı olarak kaynak hızı arttırılabilir. Derin bir nufuziyetin sağlanması için birinci kafada doğru akım tercih edilirken, kaynak metalinde iyi bir dolgu sağlanması için diğer kafalarda alternatif akım kullanılır. Ark üfleme kontrol altında tutulmasının zorunlu olduğu hallerde AC akım türü tercih edilir (Lincoln Electric 1994a).

2.1.4. Tozaltı kaynağında ark üfleme ve önlenmesi

Bir telden elektrik akımı geçtiği zaman etrafında manyetik bir kuvvet alanı oluşur. Bir elektrik arkı da hareket halinde bulunan bir iletken olduğu için arkın çevresinde de bir manyetik alan oluşur. Kaynak sırasında, çeşitli nedenlerden dolayı arkın çevresini saran bu manyetik alanın dengelenememesi nedeni ile arkta oluşan bu oynamalara ark üfleme adı verilir (Anık 1969). Kaynak işleminde ark üfleminin yarattığı bazı olumsuzluklar vardır, bunlar kısaca şöyle özetlenebilir;

1. Kaynak dikiş düzgün oluşamaz, ileriye doğru üflemede kaynak kepi düzleşir ve dikiş geometrisinde bozulmalar meydana gelir. Kaynak yönünün tersine doğru olan geriye üflemede ise, dikiş daralması ve gözenek oluşumu ile karşılaşılır.

2. Cüruf metal altında kalır,
3. Sıçramalar ve kaynak kenarında yanma olukları oluşur,
4. Nufuziyet eksikliği ve buna bağlı olarak problemlili bir kaynak işlemlisi oluşur.

Ark üflemlisinin engellenmesi için; kaynak teline uygun bir eğim verilip kısa ark boyu ile çalışılarak gerilim düşürülür. İnce çaplı tellerdeki ark boyu kısa olduğu için olabildiğince ince çaplı tel kullanımına gidilir, uzun kaynak kablolarının oluşturduğu kıvrımlardan kaçınılır, DC yerine olanaklı ise AC akım türü seçilir, kaynak hızı ve buna bağlı olarak akım şiddeti düşürülür (Oğuz 1989).

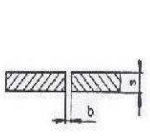
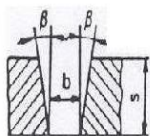
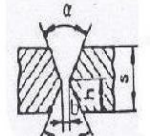
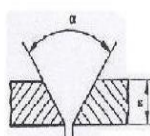
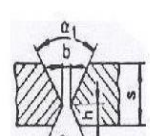
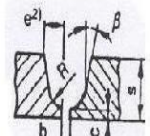
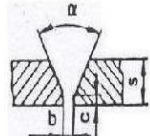
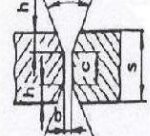
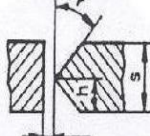
2.2. Tozaltı Kaynak Yönteminde Kullanılan Kaynak Parametreleri

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak parametreleri, kaynak işlemlisinin ve elde edilen kaynak bağlantısının kalitesini belirleyen en önemli etkenler olup, kaynak edilen metalin türü ve parça geometrisi göz önüne alınarak saptanırlar. Burada, kaynak akımı, ark gerilimi, kaynak hızı ve kaynak ağzı biçimi temel kaynak parametreleridir. Bunun yanı sıra, kullanılan akım türü ve kutuplama, kullanılan tel çapları, toz yığılma yüksekliği, serbest tel uzunluğu, kaynak yapılan düzlemin eğimi, kaynak kafa sayısı, elektrot açısı ve elektrotlar arası uzaklık gibi bir dizi ikincil kaynak parametreleri vardır. Bu değişkenler birbirlerinden bağımsız olmayıp, birinin değiştirilmesi durumunda arzu edilen sonuca ulaşmak için diğerlerinden bir veya bir kaçının değiştirilmesi gerekebilir. Bu nedenle, söz konusu tüm bu kaynak değişkenlerinin etkilerinin iyi bilinmesi ve kontrol altında tutulması, iyi bir kaynak dikiş kalitesinin elde edilmesi için son derece önemlidir.

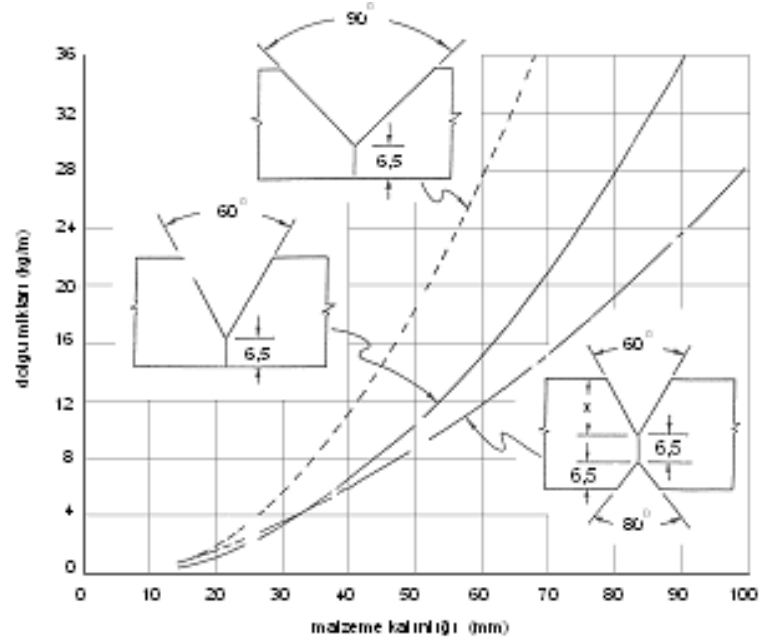
2.2.1. Kaynak ağzı

Ark kaynağında, iyi nufuziyetli bir kaynak bağlantısının elde edilebilmesi için, kaynak birleştirme yerinin hazırlanması son derece önemlidir. Kaynağa hazırlık çalışması, kaynak yerinin temizlenmesi ve kaynak ağzının açılması olarak başlıca iki noktada düğümlenir. Kaynak ağzı esas olarak, nufuziyet derinliğini arttırmak için yapılır. Kaynak ağzı biçimine, birinci derecede kaynak edilecek parçanın

kalınlığı etki eder. Birleştirme kaynağında, belirli bir kalınlığa kadar, parçaya ağız açmadan bir paso ile tozaltı kaynağı yapma olanağı vardır; ancak, belirli bir kalınlıktan sonra birleştirilecek parçalara çeşitli türlerde ağız açılır (Şekil 2.3). Ağız açısı büyüdükçe nufuziyet artmakta ve dikişin yüksekliğı azalmaktadır; ayrıca, ek kaynak metali tüketimi artar (Şekil 2.4). Ağız açısı küçüldükçe, daha dar ve daha derin bir kaynak dikişini elde edilir; yani, kaynak dikişinin genişlik/derinlik oranı küçülerek, çatlak oluşum tehlikesi artabilir. Bu nedenle, toz kalıntı ve çatlak oluşum tehlikesinin azaltılması için, kaynak ağız açısının 60° 'den büyük olması önerilmektedir (Lincoln Electric 2000). Maksimum ağız açısını belirleyen ölçüt, dolgu metali ile esas metalin karışım oranıdır. Alın yüksekliğı azaldıkça malzemenin delinme tehlikesi artar. Alın yüksekliğini belirleyen ölçüt ise elde edilmek istenen nufuziyet derinliğidir.

kaynak ağızı	işaret	kaynak ağızı	işaret	kaynak ağızı	işaret
	II		V		X
	V		X		Y
	Y		X		K

Şekil 2.3. Tozaltı kaynağında kullanılan bazı kaynak ağız biçimleri (Anık ve diğ. 1991a).



Şekil 2.4. Tozaltı kaynak yönteminde, kaynak ağızı ile dolgu miktarı arasındaki ilişki (Lincoln Electric 2000).

2.2.2. Akım yoğunluğu

Akım yoğunluğu ($I/A=A/mm^2$), akım şiddetinin tel kesitine oranıdır. Akım yoğunluğunun artması ile dikişin nufuziyeti artar. Ayrıca, akım yoğunluğunun artması ile ergime gücü de artacağından, dikiş yüksekliğinde de artış olur. Kaynak tel çapının artması, akımın sabit kalması durumunda, akım yoğunluğunun azalmasına dolayısıyla nufuziyetin azalmasına yol açar. Bunun dışında, tel çapının artması ark tutuşmasında zorluk yaratır ve düzensiz arka neden olur. Tel çapı arttıkça kaynak telinin akım yüklenebilme kabiliyeti artar, yani iş parçasına daha yüksek seviyede akım yüklenebilir (Muller and Wolff 1983).

2.2.3. Kaynak akım şiddeti

Akım şiddeti, kaynak dikişin biçimi üzerine en büyük etkiyi gösteren parametrelerden birisidir, kaynak telinin ergime hızı ve miktarını kontrol eder. Bunun yanı sıra, ergiyen esas metal miktarını ve nufuziyet derinliğini etkiler. Seçilen kaynak hızı için akımın çok fazla olması durumunda ergiyen tel miktarı

artar, buna bağlı olarak dikiş yüksekliği, genişliği ve nufuziyet derinliği de artar. Dolayısı ile kaynak banyosu büyür ve ısdan etkilenen bölge genişler. Kaynak akımının çok fazla olması durumunda ise, düzensiz bir ark meydana gelir ve iş parçasının delinme tehlikesi artar. Akımın çok düşük olması ise hem nufuziyet yetersizliğine hem de kaynak kepi yüksekliğinin arzu edilen seviyenin altında kalmasına neden olur.

2.2.3.1. Akım şiddeti ile tel ilerleme hızı arasındaki ilişki

Akım şiddeti ile kaynak telinin ergime miktarı arasındaki ilişkiyi çıkarmak için uzun yıllardır süregelen birçok çalışma yapılmıştır. Bu alanda gerçekleştirilen ilk çalışma DC(+) akım türü ve düşük alaşımlı çelikler için Lesnewich tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki dönemde, Lesnewich 'in bu çıkarımı bazı deneysel çalışmalar temel alınarak Robinson tarafından hem DC(+) hem de DC(-) akım türü için yeniden düzenlenmiştir (Sugitani 1991). Son yıllarda ise, benzer çalışmalar Chandel ve Tusek tarafından da yapılmıştır. Matematiksel modelleme yolu ile yürütölen bu çalışmaların sonucunda, tozaltı kaynak yönteminde DC(+), DC(-) ve AC akım türleri için akım şiddeti ile tel ergime hızı arasındaki ilişki formöle edilmiştir (Chandel et al 1996, Tusek 1999).

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

Yine benzer şekilde, Lincoln Electric, 25 mm tel yüksekliği ve DC (+) akım türü ile 50 mm tel yüksekliği ve DC (-) akım türü için değişik akım değerlerindeki tel ergime hız ve miktarlarını içeren çeşitli tablo ve grafikleri teknik bültenlerinde yayınlamıştır (Lincoln Electric 1994b). Akım şiddetine bağlı olarak, söz konusu bu formöller yardımı ile elde edilen tel ergime miktarları Tablo 2.1 'de verilmiştir.

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

$$MR_{DC(+)} = 0.010371 \cdot I + (2,2426 \times 10^{-6} \cdot I^2 \cdot L)/d^2 - 0,462 \quad (2.1)$$

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

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

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

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

Metals Handbook tarafından verilen formül;

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

Genel olarak, tel çapının büyümesiyle birlikte tel ergime miktarının azaldığı, buna karşın kaynak akım değerinin ya da serbest tel uzunluğunun artması ile birlikte tel ergime miktarının da arttığı gözlenmektedir. Tablo 2.1'den de görüldüğü gibi, Lincoln Electric ve Metals Handbook 'a göre elde edilen değerlerin sadece DC(+) akım türü için geçerli olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, söz konusu bu formüllerin spiral dikişli boru üretiminde yapılacak olan tel ergime hesaplamalarına yardımcı olamayacağı düşünülmektedir. Chandel'ın formülleri, Tusek 'in formüllerine kıyasla daha yüksek tel ergime miktarlarını vermektedir.

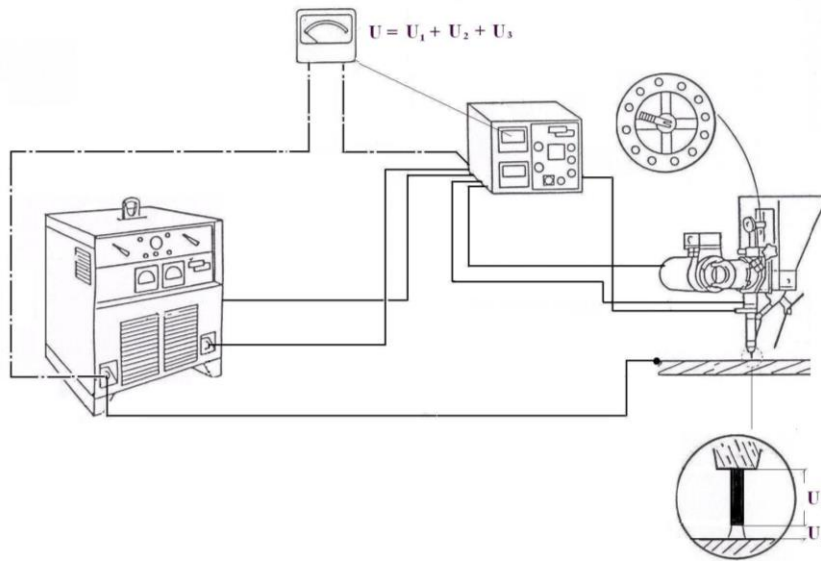
Tablo 2.1. 3,2 mm tel çapı için kaynak akımına bağlı olarak ergime miktarı (kg/h).

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

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

2.2.4. Ark gerilimi

Ark gerilimi esas olarak, ergime bölgesinin ve kaynak kepini biçimine etki eder. Ark geriliminin yükseltilmesi ile birlikte, kaynak kepi daha geniş ve düze yakın bir biçim alır. Ancak, ark içinde kalan toz miktarı artacağından toz kullanımı da artar. Gerilim yükseldikçe, dikişin nufuziyeti azalır. Ark gerilimi, ark boyunun bir fonksiyonudur; yani, ark boyu değiştiğinde ark gerilimi de değişir. Yüksek bir ark gerilimi, uzun ark boyu ile çalışmayı gerektirir (Şekil 2.5). Bu da, daha fazla miktarda tozun cüruf haline geçmesine neden olur. Bunun sonucunda da, kaynak dikişinin kimyasal bileşimi değişir; örneğin, asit karakterli toz kullanımı durumunda, dikişteki Si miktarı yükselir. Kaynak dikişinde çatlama neden olan Mn ve Si içeriğini kontrol altına almak için gerilim sınırlaması önem taşımaktadır.



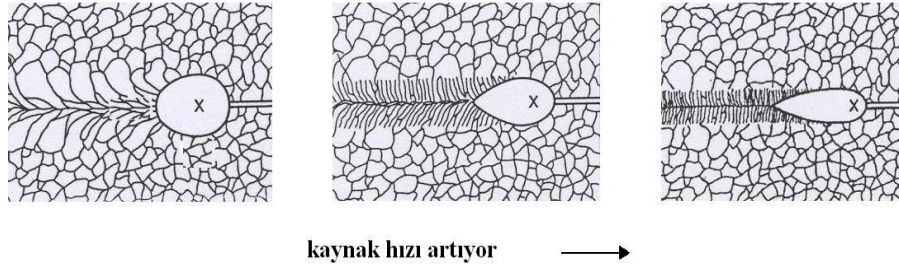
Şekil 2.5. Tozaltı kaynağında ark geriliminin gösterimi (Lincoln Electric 2000).

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

2.2.5. Kaynak hızı

Üretim hızını ve kaynak dikişinin metalürjik açıdan kalitesini belirleyen en önemli parametrelerinden birisidir. Ayrıca, kaynak hızı kaynak bağlantısının mekanik ve tokluk özellikleri üzerinde son derece etkili olan ısı girdisini de etkilemektedir. Düşük bir hızla yapılan kaynakta ergiyen ek kaynak metali (tel) miktarı artar; dolayısı ile kaynak banyosu büyür. Diğer bir deyişle, ısı girdisi artar ve normal kaynak hızlarında delinmemesi gereken parçalarda, delinme tehlikesi ortaya çıkar. Aşırı hız düşümü durumunda, çatlak oluşum tehlikesinin çok yüksek olduğu şapkalı kaynak kepi oluşur. Düşük kaynak hızlarında, elektrot fazla uzaklaşmadan banyo katılaşmaya başlayacağından, dikiş üzerindeki tırtıllar arasındaki açı büyür. Ayrıca, arkın dışına taşarak cüruf kalıntısına neden olabilecek düzeyde oldukça büyük bir kaynak banyosu oluşturur. Kaynak hızı yükseldikçe, nufuziyet ile dikiş genişliğinin azaldığı görülür. Ayrıca, kaynak hızının artması ile birlikte dikiş üzerindeki tırtıllar arasındaki açı da küçülmeye başlar. Kaynak hızının aşırı yüksek olması durumunda nufuziyet azalır, yanma oluşu, gözenek, ark üflemesi ve düzensiz bir dikiş oluşum tehlikesi artar (Lincoln Electric 1994b, ESAB 1999).

Kaynak dikişi genel olarak ergiyen tel ile ergiyen esas metalden oluşur. Tozaltı kaynağında, kaynak metali içindeki ergiyen esas metal miktarı %10 ile 60 arasında olup, bu oran kaynak hızının yükselmesi ile azalan yönde değişir; yani, kaynak metali içindeki ergiyen esas metal miktarı azalır (ASM Handbook 1983). Kaynak hızı ile kaynak banyosunun biçimini de kontrol etme olanağı vardır. Düşük hızlı bir kaynak işleminde kaynak banyosu hemen hemen dairesel (eliptik) iken, kaynak hızının artması ile bu dairesellik kaybolur (Şekil 2,6).



Şekil 2.6. Kaynak hızının kaynak banyo biçimi üzerindeki etkisi (Linnet 1994).

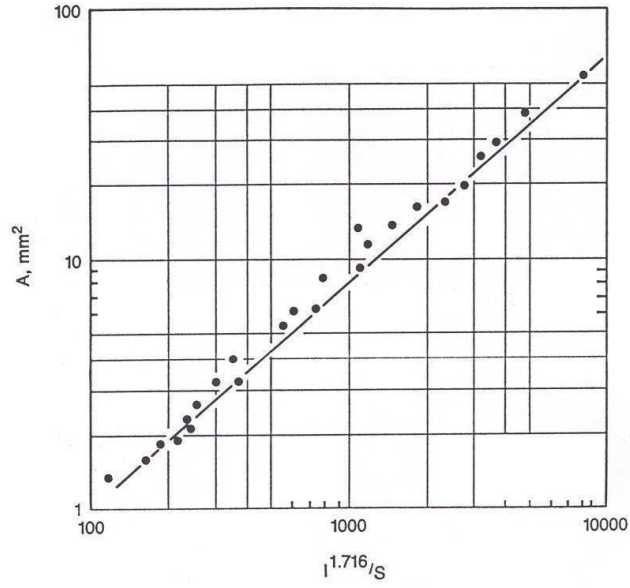
Yapılan araştırmalar, ark geriliminin ergimiş bölgenin kesit alanı üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığını, buna karşın kaynak hızı ve kaynak akım şiddetinin ergimiş bölgenin kesit alanını belirleyen asıl etkenler olduğunu göstermiştir. Tozaltı kaynağı ile yapılan bu çalışmalardan birinde, ergimiş bölgenin kesit alanı ile kaynak hızı ve kaynak akımı arasındaki ilişki Denklem 2,6 'da ki gibi formüle edilmiştir (Linnet 1994). Logaritmik olarak hazırlanmış bu formülde; A, ergimiş bölgenin kesit alanını (mm^2), I, kaynak akım şiddetini ve S, kaynak hızını (cm/dk) ifade etmektedir. Şekil 2,7 'de, ergime kesit alanının $I^{1,716}/S$ 'in bir fonksiyonu olarak değişiminin grafiksel gösterimi, Şekil 2,8 'de ise nomograf olarak düzenlenmiş hali verilmektedir. Söz konusu bu denklemin yeniden düzenlenmesi ile kaynak ağzı açılmamış tek pasolu alın kaynağında, ergime kesit alanının Denklem 2,7 'ye göre kolaylıkla hesaplanması olanaklıdır.

$$\log_{10} A = 0,903 \cdot \log_{10} (I^{1,716}/S) - 0,78 \quad (2,6)$$

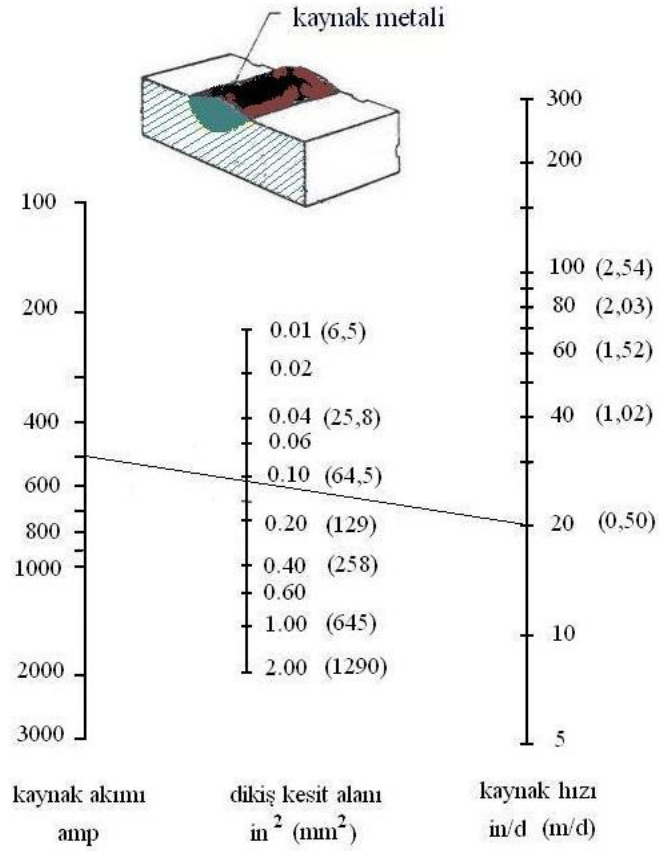
$$A = I^{1,55} / (10^{3,95} \cdot S^{0,903}) \quad (2,7)$$

Tek pasolu alın kaynağında, kaynak akımı, kaynak hızı ve gerilime bağlı olarak nufuziyet derinliği aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanabilir; Burada, I, kaynak akım şiddetini (A), S, kaynak hızını (inç/dk), E, ark gerilimini (V), P ise nufuziyet derinliğini (inç) ifade etmektedir. K ise sabit bir sayı olup, CS türü tozlar için 0,0012 olarak alınabilir. Söz konusu bu formülün grafiksel gösterimi ise Şekil 2,9 'da verilmiştir. Kaynak hızı ile kaynak akımı arasındaki oran, yanma oluşu üzerinde oldukça etkilidir. Kaynak hızı ile kaynak akımının tek pasolu kaynak bağlantılarında yanma oluşu üzerindeki etkisi Şekil 2.10 'da verilmiştir.

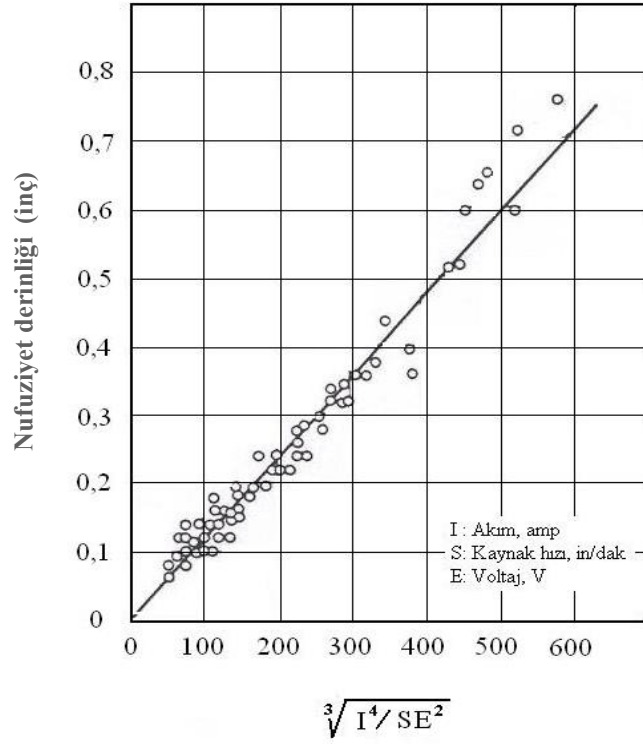
$$P = K \sqrt[3]{I^4 / S \cdot E^2} \quad (2,8)$$



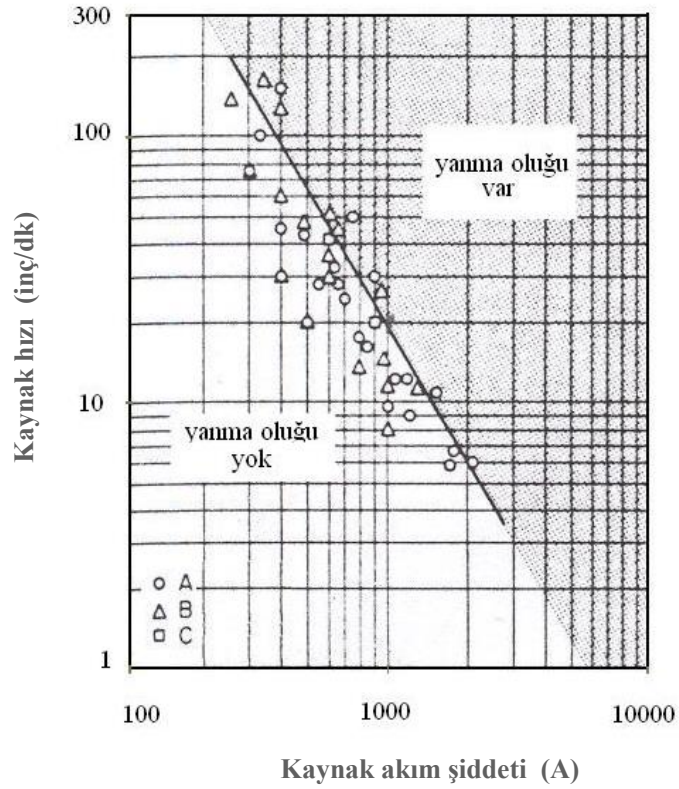
Şekil 2,7. Tozaltı kaynağında kaynak akımı ve kaynak hızının ergime kesit alanı üzerindeki etkisi (Linnet 1994).



Şekil 2,8. Kaynak akımı, kaynak hızı ve ergime kesit alanı arasındaki ilişki (ASM Handbook Committee 1983).



Şekil 2.9. Kaynak akımı, kaynak hızı ve ark geriliminin nufuziyet derinliğine etkisi (ASM Handbook Committee 1983).

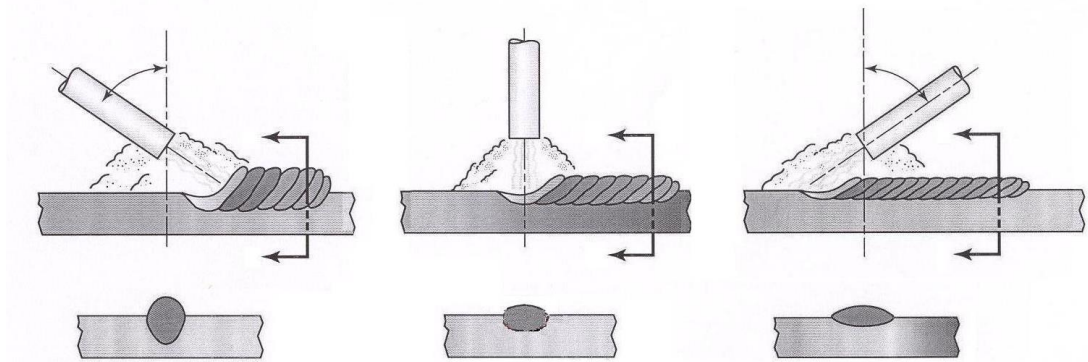


Şekil 2.10. Kaynak hızı, kaynak akımı ve yanma oluşu arasındaki ilişki (ASM Handbook Committee 1983).

2.2.6. Kaynak düzlemi ve elektrot açısı

Diğer tüm kaynak yöntemlerinde olduğu gibi, tozaltı kaynağında da kaynak elektrotunun eğim açısı kaynak dikiş biçimini ve nufuziyetini etkiler. Elektrotun ucu kaynak yönünün aksi yönüne doğru yönelmiş ise, bu tekniğe “sağa kaynak tekniği”, elektrotun ucu kaynak doğrultusuna göre yönelmiş ise buna “sola kaynak tekniği” adı verilir (Eryürek 1998). Tüm diğer koşullar aynı tutularak, hareket açısı sıfırdan itibaren sola kaynak tekniğine doğru artırılacak olursa nufuziyet azalır ve kaynak dikişi geniş ve düz bir durum alır. En yüksek nufuziyet sağa kaynak tekniği ile hareket açısı 25° iken oluşur. Sağa kaynak tekniği aynı zamanda, daha dış bükey ve daha dar bir dikiş oluşturur. Tüm pozisyonlarda, kaynak banyosunun daha iyi kontrol edilebilmesi için önerilen elektrot eğim açısı 5 ila 15° ‘dir (Şekil 2.11).

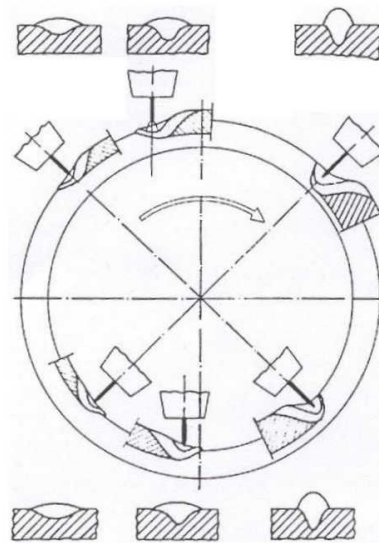
Tozaltı kaynağı esas olarak yatay pozisyonda yapılır. Kaynak yapılan parçanın bulunduğu yatay düzleme göre sahip olduğu eğimin 6° 'yi aşması durumunda, kaynağın yönüne göre kaynak dikişin biçimi de değişir. Eğimli yüzeylerde yokuş aşağı yapılan kaynaklarda nufuziyet oldukça az ve dikiş geniştir, yokuş yukarı yapılan kaynaklarda ise nufuziyet ve dikiş yüksekliği çok fazla, kaynak dikiş genişliği ise azdır. Yokuş yukarı yapılan kaynakta dikişte çatlak oluşumu, yokuş aşağı kaynakta ise birleşme hataları ve cüruf kalıntıları meydana gelebilir (Tülbenççi 1998). Aşağıya doğru kaynakta, kaynak banyosu elektroda doğru akma eğilimi gösterir, bu ise düzensiz bir ergime bölgesi oluşturur.



Şekil 2.11. Elektrot eğiminin kaynak dikiş biçimi üzerindeki etkisi.

Çevresel kaynak ya da silindirik parçaların kaynağı, düz bir sacın kaynağına göre bazı farklılıklar gösterir. En önemli farklılık, ergimiş toz cürufu ve ergimiş kaynak banyosunun akma eğilimi göstermesidir. Kaynak metalinin akmasını engellemenin tek yolu ise, kaynak banyosunun borunun düşey eksenine geldiğinde katılaşmasını tamamlamış olmasıdır. Bu nedenle, silindirik parçaların kaynağında telin bulunduğu yerin dikey eksenin sağında veya solunda bulunması ve telin ucu ile dikey eksen arasındaki mesafenin fazlalığı veya azlığı kaynak dikişin biçimine etki eden önemli faktörlerdir. Telin yeri ile eksen arasındaki uzaklık, yokuş yukarı yönde artarsa nufuziyet azalır ve dikiş genişler ve aynı zamanda cüruf kalıntılarına neden olur. Eğer bu uzaklık yokuş aşağı yönde artarsa, nufuziyet ve dikiş yüksekliği artar (Şekil 2.12).

Kafa eğim açıları tek kafa, çift kafa ya da üç kafa kullanım durumuna göre farklılık göstermektedir. Tek kafa kullanımında Lincoln Electric (1983) elektrot eğim açısını 3-5° sola kaynak tekniği olarak vermektedir. Çift kafa kullanımında ise ilk kafanın eğim açısı bütün kaynaklarda 0° olarak verilirken ikinci kafanın eğim açısı, Lincoln Electric (1993) ve Metals Handbook (1983) 'de 12-15° sağa kaynak tekniği, Messer Griesheim (1970) 'de 25° sağa kaynak tekniği olarak önerilmektedir. Europipe uygulaması ise 15-20° sağa kaynak tekniği şeklindedir (Brensing and Summer 1998).



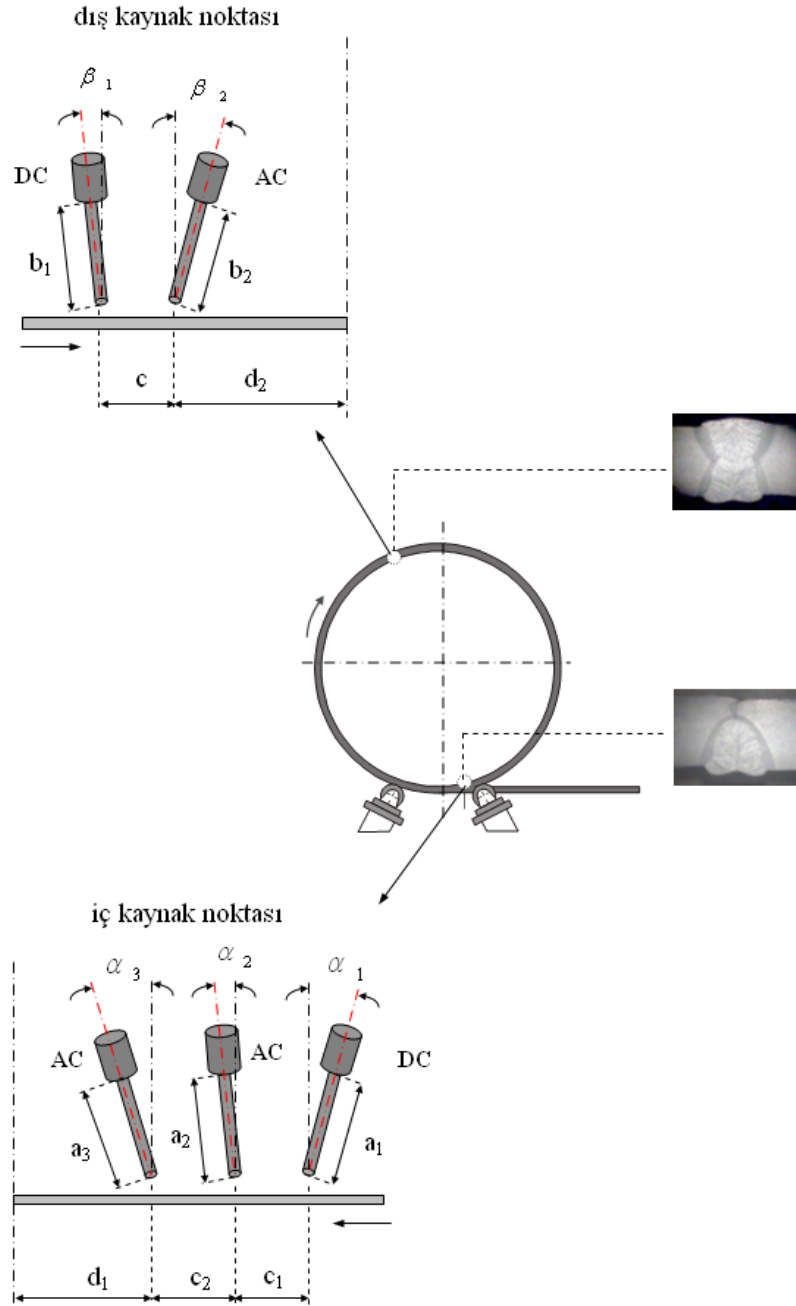
Şekil 2.12. Kaynak düzleminin kaynak biçimi üzerindeki etkisi (Tülbentçi 1998).

2.2.7. Serbest tel uzunluğu ve elektrotlar arası uzaklık

Kaynak telinin dışarıda kalan kısmı (serbest tel uzunluğu), kaynak memesinin parçaya olan uzaklığı ile ifade edilir. Akım yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda ($>125 \text{ A/mm}^2$), telin serbest ucunun uzunluğu önemli bir faktör olarak kendini belli eder (Tülbentçi ve diğ. 1997b). Serbest tel uzunluğunun artması, elektrik direncinin artmasına bu da kaynak telinin daha fazla ısınarak tel ergime miktarında küçük de olsa bir artışa neden olur. Tozaltı kaynak yönteminde, telin serbest ucunun uzunluğunun artması, elektriksel olarak devreye bir direncin daha eklenmesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle, serbest tel ucunun arttırılması halinde ark gerilimini de arttırmak gerekir. Düşük ark gerilimi, yani tel serbest uzunluğunun artması, nufuziyetin azalmasına, kaynak dikişinin daralmasına, dikiş yüksekliğinin artmasına ve cürufun temizlenmesinin zorlaşmasına yol açar. Deneyimler, temas memesi ile iş parçası arasındaki uzaklığın azalmasıyla daha kararlı bir arkın olduğunu ve daha homojen görünüşlü bir kaynak dikişinin elde edildiğini göstermektedir; zira serbest tel ucunun aşırı fazla olması durumunda memeden çıkan tel ucunun salınımlar yapması, arkın pozisyonunun değişmesine ve bu da dikişin bozulmasına yol açar. Spiral dikişli boru üretimi için önerilen serbest tel uzunluğu 20-35 mm arasındadır.

Çevresel kaynak uygulamalarında, elektrotlar arası uzaklığın kaynak dikişinin biçimi ve kalitesi üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Elektrotlar arasındaki uzaklığın azalması daha dar ve daha derin bir nufuziyete sahip dikiş elde edilmesine yol açar. Elektrotlar arasındaki uzaklık arttıkça, dikiş genişler ve nufuziyet azalır. Elektrotlar arası uzaklık aynı zamanda ark kararlılığı üzerinde de etkin bir şekilde rol oynar. Elektrotlar birbirine çok yakın olması durumunda, ergimiş metalin ya da cürufun geriye akarak ilk arkın altına girmesi ve arkta düzensizliklere yol açması olasıdır. Elektrotların birbirine çok uzak olması halinde ise, ergimiş metalin katılaşması nedeni ile ikinci arkta düzensizlikler oluşabilir (Lincoln Electric 1998). Elektrotlar arasındaki uzaklık, Lincoln Electric (1993) tarafından 11-40 mm, Messer Griesheim tarafından 12-35 mm olarak önerilmektedir. Mannesmann Euro Pipe uygulaması ise 16-20 mm'dir.

Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde de kaynak kafalarının pozisyonlaması oldukça büyük bir öneme sahiptir (Şekil 2.13). Burada, kafa eğim açıları, kafalar arası uzaklık, kaynak noktasının borunun düşey eksenine göre konumu ve her bir kafadaki serbest tel uzunluğu, gerek elde edilecek olan kaynak dikişinin biçimi gerekse hata oluşumu açısından oldukça önemli etkiye sahip parametrelerdir.



Şekil 2.13. Spiral dikişli boru üretiminde kaynak kafalarının yerleşimi.

2.3. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Sarf Malzemeleri

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

2.3.1. Kaynak tozları

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

2.3.1.1. Ergimiş tozlar

Bu tozların üretiminde kuvarz, manganez cevheri, dolomit ve kil gibi maddeler belirli bir oranda karıştırılarak, ergitme fırınında bir araya getirilir. Fırınlarındaki ergime işlemi 1500 ile 1800 °C arasında gerçekleşmekte olup, fırında ergiyen karışım, tane boyutlarında homojenlik sağlama amacı ile ufalanarak eleme işleminden geçirilir. Daha sonra da su verilerek soğutma yapılır.

Pahalı bir yöntem olmakla birlikte, tane büyüklüğündeki homojenlik, tanelerin aynı kimyasal bileşime sahip olması ve nem alma özelliğinin çok düşük olması gibi bir dizi üstünlüğü vardır. Ancak, ergimiş tozlar bünyelerindeki hidroksil iyonları (OH) nedeni ile kaynak metalindeki hidrojen içeriğinin artmasına neden olur. Ergimiş tozların üretimleri sırasındaki ergime nedeni ile yapısında var olan metalik katkıların çoğu oksitlenerek yapıdan ayrılır. Bu nedenle, ergimiş tozlar genellikle nötr toz grubuna girerler. Tozun üretimi sırasındaki ergime sıcaklığının yüksek olması nedeni ile tozun bünyesine dezoksidan ve alaşım elementlerinin eklenmesi olanaklı değildir (Anık 1982).

2.3.1.2. Karışık tozlar

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

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

2.3.1.3. Aglomere tozlar

Aglomere tozlar son zamanlarda geliştirilen ve kullanımı gittikçe artan tozlardır. Tozun üretiminde genel olarak silikatlar, floridler, demir oksitler ve karbonatlar ile kaynak işlemi sırasında cüruf oluşumu, arkın iyonizasyonu ve dezoksidasyonu gibi görevleri yerine getiren maddeler kullanılır. Toz taneciklerinin olabildiğince

aynı tane büyüklüğünde, aynı ağırlıkta ve aynı biçimde olması arzu edilir. Ham tozlar, seramik veya mineral esaslı bir yapıştırıcı madde ile karıştırılarak 500 ila 800 °C arasında aglomerasyon işlemine tabi tutulur. Aglomerasyon işleminden sonra var olan nemin alınması için, karışım tavlama işlemine tabi tutulur ve daha sonra elenerek istenen tane büyüklüğüne erişilir. Karışık ve aglomere tozlar nemli ortamlarda uzun süre kaldıklarında nemi bünyelerine çekerler. Bu da, kaynak işlemi sırasında, kaynak metalinde çatlamaya yol açan hidrojen oluşumuna neden olur. Aglomere tozlar, ergimiş tozlara nazaran şu farklılıklara sahiptir;

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

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

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

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

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

2.3.1.4. Kaynak tozlarının kimyasal özellikleri

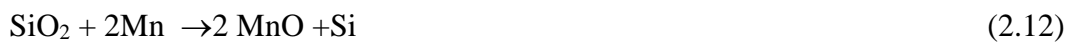
Kaynak tozları, baziklik ölçөгüne (Tablo 2.2) ve kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılmaktadır. Tozların sahip olduğu kimyasal özellikler, damla hacmi ve frekansını etkilemektedir. Sabit kaynak parametreleri ile en yüksek damla frekansı nötr tozlarda, en düşük damla frekansı ise yüksek bazik karakterli kaynak tozlarında elde edilmektedir. Bonischewski 'ye göre kaynak tozlarının baziklik ölçөгü formülü denklem 2.10 'da verilmiştir. Söz konusu bu denklemde, paydaki bileşenler bazik, paydadaki bileşenler ise asit karakterli bileşenlerdir. Buradaki nötr kavramı ile kaynak tozunun alaşımlama yeteneği değil, tozun içindeki bazik ve asidik bileşenlerin oranı ifade edilmektedir.

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

Tablo 2.2. Kaynak tozlarının bazikliğe göre sınıflandırılması (Linnert 1994).

Kaynak tozu	Asidik	Nötr	Bazik	Yüksek bazik
Baziklik ölçeği (B)	≤1,0	1,0 – 1,5	1,5 – 2,5	>2,5

Genel olarak kaynak tozlarının büyük bir kısmını SiO₂ oluşturur. SiO₂ tozun özellikle yüksek akım şiddeti ile yüklenebilmesini sağlar. Tozdaki silisyum, kaynak sırasında kaynak banyosunu dezokside ederek gazı alınmış bir kaynak banyosu meydana getirir ki, bu da dikişin gözeneksiz olmasını sağlar. Si ayrıca cürufun akışını sağlar. Mangan içermeyen fakat Si miktarı yüksek tozlar, kir ve pasa karşı çok hassas olduğu için malzemenin kaynak ağzı iyi temizlenmelidir. Tozda bulunan bir diğer önemli madde de MnO 'dur. MnO miktarı arttıkça tozun akım yüklenebilme kabiliyeti azalır. Çoğu kaynak tozları, bünyelerinde %10 dolayında MnO içerir. Kaynak tozu bileşimindeki SiO₂ miktarının %40 'ı geçmesi ile birlikte kaynak metalindeki Si miktarı hızlı bir artış gösterir. Tozaltı kaynağı uygulamasında, işlem sırasında ortaya çıkan metalürjik olaylar büyük anlam taşımaktadır. Bu reaksiyonların derecesi, Si ve Mn 'nın redüklenmesi ve bununla birlikte kaynak dikişine geçişine, kaynak tozunun karakterine, reaksiyon bölgesindeki sıcaklığa, uygulanan kaynak parametrelerine, birbirine ilgi duyan elementlerin derişiklik oranına ve reaksiyon süresine bağlı olarak değişmektedir. Tozaltı kaynağında, ergimiş kaynak metalini ile ergimiş toz arasında bir dizi kimyasal reaksiyon oluşur. Örneğin, MnO içermeyen yüksek SiO₂ içerikli kaynak tozlarında kaynak metalini tozdan büyük miktarda silisyumu indirger. Aynı zamanda, kaynak telindeki mangan oksidasyona uğrar (Denklem 2.11 ve 2.12). Bu da, kaynak metalindeki silisyumun artmasına ve manganın azalmasına yol açar. Bu gibi durumlarda, dikişin Mn miktarını ayarlamak için yüksek Mn içerikli kaynak telleri kullanılmalıdır (Anık 1982). SiO₂ ve MnO içeren tozlarda, tozdaki MnO buharlaşan demirle birleşerek indirgenir. Böylelikle tozdan kaynak metaline Mn geçişi gerçekleşir (Denklem 2.13).



Manganın oksidasyonu sonucunda serbest kalan Si kaynak metaline geçer (Denklem 2.9). Kaynak metaline tozdan Mn ve Si geçişine ark gerilimi, kaynak hızı, tel çapı, kaynak ağız açısı gibi faktörlerin oldukça önemli etkisi vardır. Akım şiddeti yükseldikçe Mn ve Si 'un yanma miktarı da artacağından kaynak metalinin içerdiği Mn ve Si miktarı azalır. Öte yandan, kısa ark boyu ile kaynak yapıldığında uzun ark boyuna kıyasla daha az toz reaksiyona girmekte ve dolayısıyla kaynak banyosu da daha az alaşımlanmaktadır. Kaynak hızı arttıkça kaynak metalindeki Mn ve Si miktarı azalır. Kaynak tel çapı arttıkça kaynak yerine yığılan toz miktarı artar ve böylelikle kaynak metaline geçen Mn ve Si miktarı da artar (Anık 1982). Kaynak tozlarının metalürjik davranışı alaşım elementlerinin yanma ya da geçişi ile karakterize edilir. Yanma (burn out) ve geçiş (pick up), kaynak metalinin kimyasal bileşimi ile kaynak telinin kimyasal bileşimi arasındaki fark olarak tanımlanabilir. Si ve Mn, yüksek mukavemetli az alaşımlı çeliklerin kaynak metali özellikleri üzerinde son derece önemli etkiye sahip elementlerdir. Bu nedenle, Si ve Mn reaksiyonları kaynak tozlarının sınıflandırılmasında önemli bir temel oluşturur. Kaynak metalindeki Mn miktarı yaklaşık bir değerle Denklem 2.14 'e göre hesaplanabilir. Burada, Mn_{kaynak} , Mn_{tel} ve Mn_{metal} sırasıyla kaynak metali, kaynak teli ve ana metalin Mn içeriğidir (%). ΔMn kaynak tozunun metalürjik davranışı, d ise kaynak metalindeki ana metalin oranıdır (%). Kaynak metalindeki Si miktarı da benzer şekilde hesaplanabilir (ESAB).

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

Oksijen, katılmış kaynak metalinin içinde hemen hemen hiç çözünmez ve 0,1-5,0 mikron çapında kalıntı oluşumuna neden olur. Kaynak metalinin soğuma sırasındaki faz dönüşümleri bu tür oksijen kalıntılarının varlığından etkilenir. Bu nedenle, kaynak tozunun oksijen potansiyeli son derece önemlidir. Kaynak tozundaki oksijen potansiyeli, kaynak sırasında alaşım elementlerinin kaybını ya da kazancını etkilemekle kalmaz aynı zamanda, kaynak metalinin oksijen içeriğini katılma sonrası kaynak bölgesindeki oksijen kalıntılarının miktarını, boyutlarını ve türünü belirler.

Yüksek oksijen potansiyeline sahip olan asidik karakterdeki tozlar, oldukça yüksek oranda SiO₂ ve MnO içermekte olup, kaynak metalinde 600-1000 ppm gibi yüksek bir oranda oksijen içeriğine neden olurlar. Ancak, yüksek oranda SiO₂ içeren tozlar, kaynak sırasında akım-gerilim kararlılığı ve kaynak geometrisi açısından oldukça elverişlidir. Düşük oksijen içerikli bazik tozlar ise yüksek oranda CaO, CaF₂ ve Al₂O₃ içermekte olup, kaynak metalinde 250-400 ppm düzeyinde bir oksijen içeriğine yol açarak, kaynak metalinde yüksek tokluk özelliklerinin elde edilmesine olanak sağlarlar.

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

MS-Mangan silikat türü tozlar: (MnO+SiO₂>%50, CaO<%15). Asit karakterli tozlar grubunda olup, kaynak dikişinde Mn artışına neden olur. Yüksek kaynak hızları ve ısı girdisi için uygundur. Ancak, O₂ içeriği yüksek olduğu için tokluk özelliği iyi değildir. Paslı yüzeylerde bile gözenek oluşumuna karşı dirençlidir.

CS-Kalsiyum silikat türü tozlar: (CaO+MgO+SiO₂>%55, CaO+MgO<%55). Kaynak dikişinde Si artışı yaratır. Çok pasolu kaynak işlemlerine uygun değildir.

ZS-Zirkonyum silikat türü tozlar: (ZrO₂+SiO₂+MnO<%45, ZrO₂<%15). Temiz yüzeylerde yanma oluşu oluşturmaksızın yüksek kaynak hızlarına olanak sağlar.

RS-Rutil silikat türü tozlar: (TiO₂+SiO₂<%50, TiO₂<%20). Kaynak metaline oldukça yüksek oranda Si geçişi sağlarken, belirli bir oranda Mn kaybına neden olurlar. Bu nedenle, yüksek ya da orta manganlı teller ile eşleştirilirler. O₂ içerikleri yüksek olduğu için tokluk özelliği iyi değildir. Tek ya da çok pasolu

kaynak uygulamalarında, yüksek akım yüklenebilme özellikleri nedeni ile yüksek kaynak hızlarına uygundur. Çelik boru üretiminde yaygın olarak kullanılırlar.

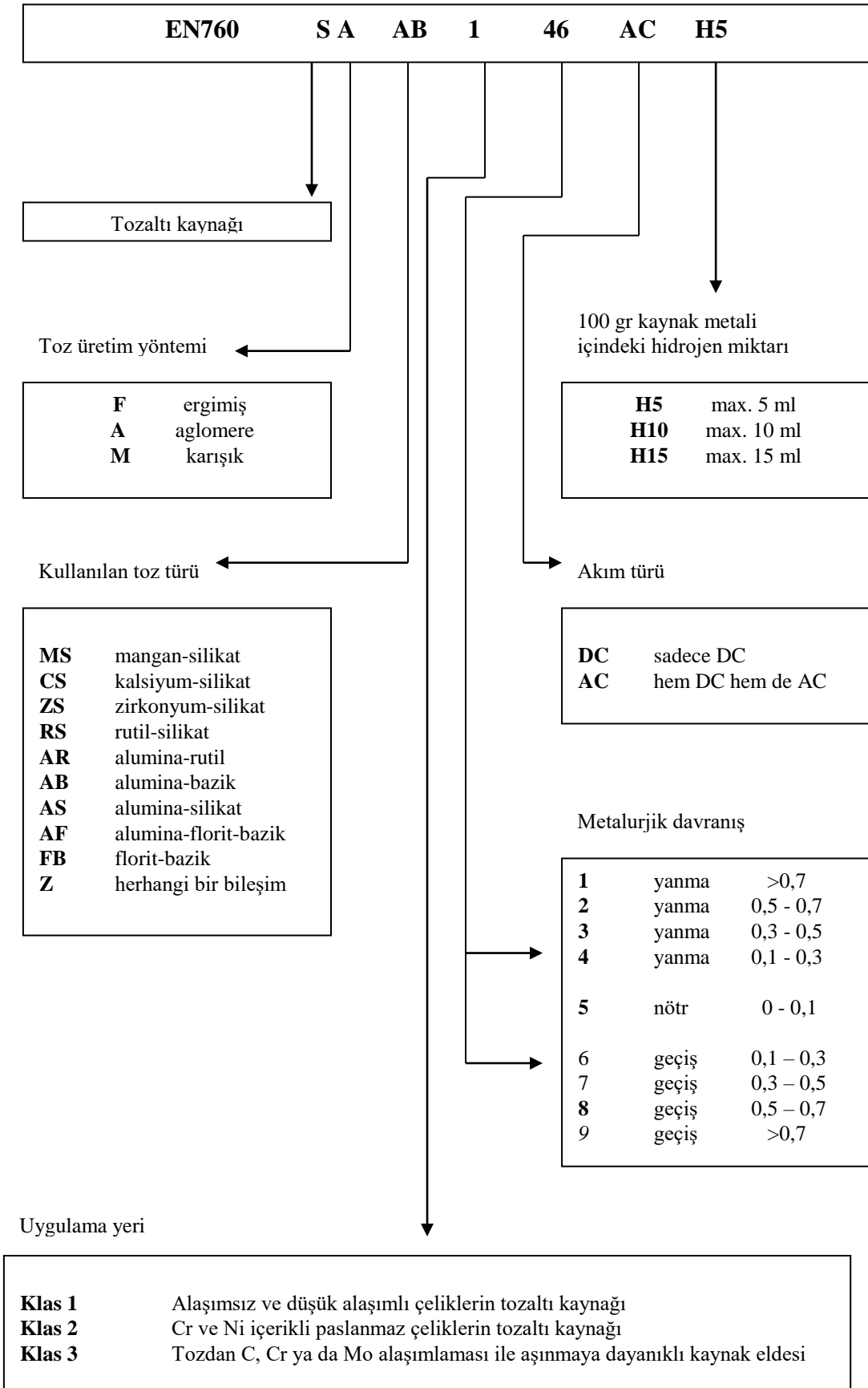
AR-Alüminat rutil türü tozlar: ($Al_2O_3+TiO_2>\%45$). Yüksek kaynak hızlarına uygun olup cüruf çözünme özelliği çok iyidir. Kaynak metaline belirli bir oranda Mn ve Si geçişi sağlar. Oksijen içeriği yüksek olduğundan, mekanik özellikleri orta düzeydedir. Hem DC hem de AC akım türünde tek ya da çok pasolu kaynak uygulamalarında kullanılabilir.

AB-Alüminat bazik türü tozlar: ($Al_2O_3+CaO+MgO>\%45$, $Al_2O_3>\%20$). Hafif bazik esaslı toz olup dikişte orta düzeyde Mn artışı yaratır. Elde edilen dikişin çatlama duyarlılığı düşük olup, çok pasolu kaynak işlemlerinde oldukça iyi tokluk ve mukavemet özellikleri sağlar. Özellikle, boru üretiminde ince taneli düşük alaşımlı çeliklerin kaynağında kullanılır.

AS-Alüminat silikat türü tozlar: ($Al_2O_3+SiO_2+ZrO_2<\%40$, $CaF_2+MgO<\%30$, $ZrO_2<\%5$). Oldukça yüksek oranda bazik bileşenler içeren bir tozdur. Genel olarak nötr karakterli toz grubuna girse de kaynak metalinde belirli bir Mn kaybı yaratır; bu nedenle, yüksek mangan içerikli tellerle kullanılır. Oldukça temiz ve düşük oksijen içerikli kaynak elde edilmesine olanak sağlar. Bazik özelliği nedeni ile cüruf akışkanlığı azdır; bu nedenle, yüksek kaynak hızlarına uygun değildir.

AF-Alumina florit bazik türü tozlar: ($Al_2O_3+CaF_2<\%70$). Nötr karakterli toz grubunda olup, alaşımlı tellerle birlikte kullanılır. AB tipi tozlara karşın daha yüksek bir ark gerilimi ile çalışılmayı gerektirir.

FB-Fluorid bazik türü tozlar: ($CaO+MgO+MnO+CaF_2>\%50$, $SiO_2<\%22$, $CaF_2>\%15$). Düşük miktarda Si ve oksijen içeren bazik esaslı tozlardır. Tokluk özelliği yüksek, çatlama duyarlılığı düşük dikiş oluşturur. Bazik özelliği nedeni ile cüruf akışkanlığı az olup, cürufun yüzeyden ayrışması problemlili olabilir; bu nedenle, yüksek kaynak hızlarına uygun değildir. Kaynak metalinde Mn kaybı yarattığı için yüksek Mn içerikli tellerle eşleştirilirler.



Şekil 2.14. EN 760 standardına göre kaynak tozlarının gösterimi.

2.3.1.5. Kaynak tozlarının fiziksel özellikleri

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

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

Kaynak banyosu üzerindeki toz örtüsünün, atmosferik gazları geçirmeyecek ve kaynak banyosunda akıntı yaratmayacak düzeyde akışkanlığa sahip olması gerekir. Kaynak tozunun kaynak banyosu üzerinde koruyucu bir örtü oluşturabilmesi için, yüksek sıcaklıklarda akışkan, kaynak sonrası oluşan cürufu temizleyebilmek içinse oda sıcaklığında kırılğan olması gerekir. Ergimiş tozun akışkanlığı yaklaşık olarak ergimiş çeliğin akışkanlığı ile aynıdır. Ancak, MS türü cürufun akışkanlığının CS türü toz cürufuna kıyasla daha büyük olması nedeni ile yüksek hızlarda MS türü tozlar kullanılır. Kaynak sırasında çıkan gazların, kaynak metali katılaşmadan önce dikişi terk etmesi gerekir. Aksi halde, dikişte kalan gazlar gözeneklere bazen

de çatlak oluşumuna neden olabilir. Gazların kaynak metalinden tamamen çıkmalarına etki eden en önemli faktörlerden biri de kullanılan tozun tane büyüklüğüdür. Tane büyüklüğü küçüldükçe, gazların çıkış kabiliyeti de azalır. Kaynak hızının yükselmesi durumunda, orta veya iri taneli bir tozun kullanılması yararlıdır. Zira hızlı yapılan kaynakta ergiyen banyo küçük olup, çabuk katılaşacağından, gazların da çok kısa zamanda dikişi terk etmeleri gerekir. Bu da ancak, iri taneli toz kullanımı ile sağlanabilir. Tane büyüklüğü arttıkça, nufuziyet ve dikiş yüksekliği az miktarda azalmakta genişlik ise artmaktadır.

Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak tozlarının yeterli düzeyde kuru olması gerekir. Toz paketi açıldığı ya da bir şekilde yırtıldığı zaman vakit geçirmeksizin kuru ve kapalı bir hacim içine alınmalıdır. Açıkta kalan tozlar için, özellikle ani sıcaklık düşümünün olduğu anlarda (güneş batımı sonrası) yoğunlaşma dolayısıyla tozun nem alma tehlikesi oldukça fazladır. Toz kurutma işlemi minimum 260 °C sıcaklıktaki uygun bir kap içinde ve tüm toz kütlelerinin bu sıcaklığa erişebileceği yeterli bir süre boyunca yapılmalıdır. Toz bu sıcaklıkta en az iki saat süre ile tutulmalıdır. Tozdaki nem miktarının fazlalığı toplam kurutma süresi gereksinimini artırabilir. Kurutma sıcaklığının 480 °C 'yi aşmaması önerilir.

Genel olarak, kurutma işleminin ergimiş tozlar için 200-300 °C ve iki saat, aglomere tozlar içinse 300-400 °C ve üç saat olarak önerilmektedir. Tozdaki nem derecesine göre, kaynak metalindeki hidrojen içeriğinin artması ile çatlak tehlikesi artar ve dikişin iç kısımlarında gözenek oluşur. Nem miktarının çok yüksek olması durumunda ise dış kısımda da gözle görülebilecek düzeyde gözenek oluşur (Lincoln Electric 1988). Yağ, gres ve boya gibi organik kalıntılar ile pas ve tufal gibi metalik kalıntılar gözenek oluşumuna neden olur. Bu nedenle, kullanılan kaynak tozunun içinde toz, pislik, tufal ve demir tozu gibi kalıntılar bulunmamalıdır. Bu amaçla, kaynak tozu sürekli bir filtre işlemine tabi tutularak, hem içindeki toz, pislik ve tufal gibi yabancı maddelerden arındırılır hem de ince tanelerin elenmesi ile toz tane büyüklüğü belirli değerlerin içinde tutulur.

2.3.2. Tozaltı kaynak telleri

Tozaltı kaynak yönteminde dolgu malzemesi olarak kullanılan tel elektrotlar, elektrik ark ocaklarında üretilen, kaynak banyosunun dezoksidasyonunu sağlamak için yüksek oranda Mn içeren çeliklerdir (Gültekin 1991). Çapları ise 1,2-12 mm arasında değişir. Tellerin yüzeyleri tamamen düz ve pürüzsüz olmalı ve yağ, pislik, pas ve tufal bulunmamalıdır. Pas ve tufal hem akım geçişini zorlaştırmakta hem de temas memelerinin çabuk aşınmasına neden olmaktadır. DIN 668 'e göre, 3.2 mm çaplı kaynak teli için çap toleransı 0.06 mm iken bu değer 4.0 mm çaplı tel için 0.075 mm 'dir. Tozaltı kaynak tellerinin bir diğer özelliği de, kaynak sırasında hem temas memesinden tele akım geçişini kolaylaştırması, hem de elektrotların paslanmasını önlemek amacıyla üzerlerinin bakır kaplı olmasıdır. Kaynak tellerinin bileşim yönünden seçimlerinde, alaşımlama özelliği ve birlikte kullanılacağı tozla uyumu en önemli etkenler olarak dikkate alınmalıdır. Amerikan standartlarında (AWS A5-17, ASTM A 558-65T) mangan miktarına göre kaynak telleri düşük mangan (%0,30-0,60 Mn), orta mangan (%0,90-1,25 Mn) ve yüksek mangan içerikli (%1,75-2,25 Mn) olmak üzere üç grupta toplanmıştır. Kaynak tellerinin bileşiminde bulunan elementlerin % sınırları ve bunların kaynak dikişindeki etkileri Tablo 2.3 'de, tel çapına bağlı olarak kaynak tellerinin çalışabileceği akım sınırları ise Tablo 2.4 'de verilmiştir (Anık 1991b). EN 756 'ya göre kaynak tellerinin gösterimi ise Şekil 2.15 'de görüldüğü gibidir.

Tablo 2.3. Kaynak tellerinde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri.

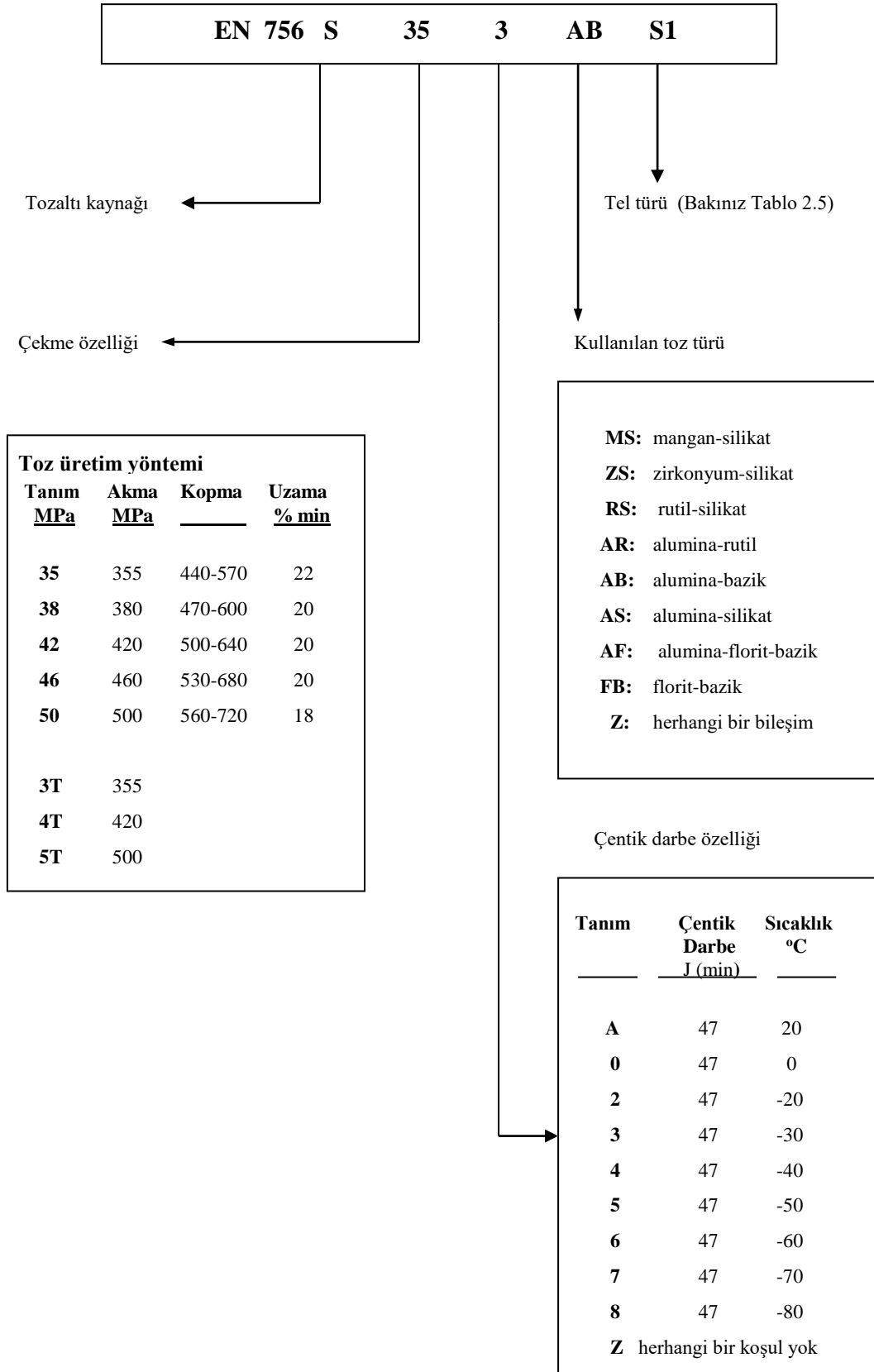
Alaşım Elementi	%	Etkisi
C	0,05-0,25	Sertlik, çekme mukavemeti
Si	0,05-0,45	Dezoksidasyon
Mn	0,5-3,0	Sertlik, çekme mukavemeti, uzama, çentik darbe mukavemeti
Mo	0,5-1,0	Isı direnci
Cr	1,0-2,9	Isı direnci, sertlik
Al	-	Dezoksidasyon
Ni	1,0-2,0	Düşük sıcaklıklara mukavemet

Tablo 2.4. Tozaltı kaynağında kaynak tellerinin çaplarına göre çalışabileceği akım şiddeti değerleri (ASM Handbook 1983).

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

Tablo 2.5. EN 756 'ya göre kaynak tellerinin kimyasal bileşimleri.

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

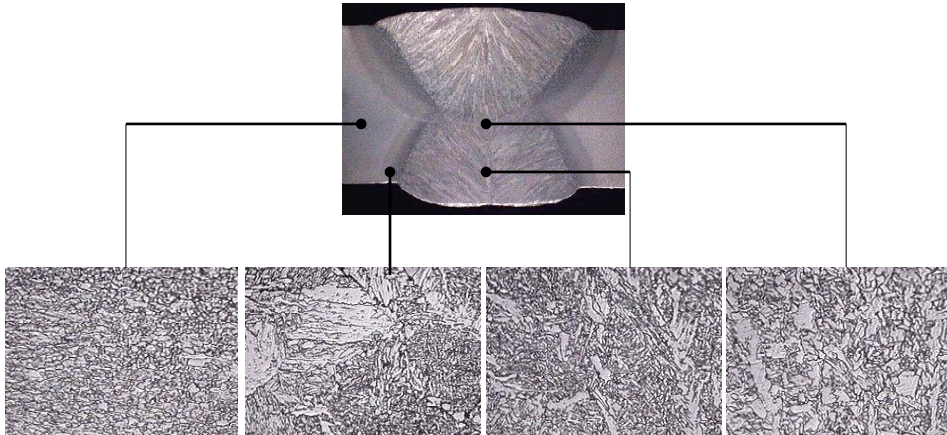


Şekil 2.15. EN 756 standardına göre kaynak tellerinin gösterimi.

2.4. Tozaltı Kaynağında Kaynak Metalürjisi

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

Tüm ergitme kaynak yöntemleri temel olarak bir döküm işlemine benzer. Elektrik ark kaynağında; ek kaynak metal, ark yardımıyla ergir ve daha önceden hazırlanmış olan kaynak ağzı içine dökülür. Bu arada, kaynak ağzının kenar yüzeyleri de bir miktar ergir ve dolayısıyla ergimiş kaynak metal ile esas metal karışarak kaynak ağzı içinde katılaşır. Bu işlem sırasında, kaynak edilen malzemenin kaynak dikişine bitişik kısımlarında metalin ergime sıcaklığından ortam sıcaklığına kadar değişik sıcaklık derecelerinde ısınmış olan bölgeler ortaya çıkar. Diğer bir deyişle, ısının yayılımı nedeni ile mekanik yapı ve içyapı özellikleri itibariyle gerek esas metal gerekse kaynak metalinden farklı özellikler içeren bölgeler oluşur (Şekil 2.16). Kaynak bağlantısının bulunduğu ve kaynak sırasında ortaya çıkan sıcaklıktan etkilenmiş bölgelerin tümüne kaynak bölgesi adı verilir. Bu bölge, ergime bölgesi ve ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) olmak üzere iki kısımdan oluşur.



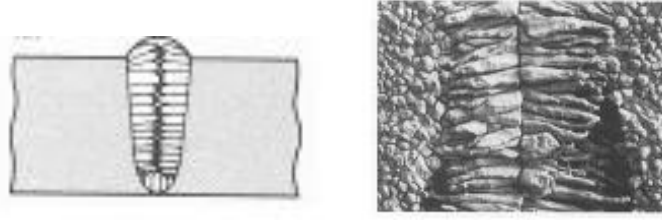
Şekil 2.16. Kaynak sırasında kaynak bölgesinde oluşan mikro yapısal değişimler.

2.4.1 Kaynak bölgesinin içyapısı

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

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

Eriyen bölgenin katılması, kendisini çevreleyen esas metale ısı iletimi ile olur. Isı eriyen bölgeden esas metale doğru çok hızlı bir şekilde aktığından dolayı, esas metale yakın olan bölgelerde aşırı soğuma sonucunda çok sayıda çekirdek oluşur. Bunların birbirlerini, herhangi bir yöne doğru serbestçe büyüme bakımından, engellemesi nedeniyle ince ve aynı zamanda yuvarlak taneler oluşur. Tek pasolu kaynak bağlantılarında dendritik taneler sıvı/katı faz sınırına dik olarak kaynak banyosu ortasına doğru büyürler ve malzeme içinde bulunan katışkıları dikiş ortasına doğru öterler (Şekil 2.17). Bu katışkılar, çoğunlukla metal olmayan fazlardır. Özellikle, kalın parçalardaki derin nüfuziyetli kaynaklarda bu iri tanelerin birleştiği yerde yani ortadaki kısımda, segregasyondan dolayı bir boşluk ve dolayısıyla bir zayıflama oluşur. Bu durumda, bu bölgedeki tokluk değeri azalır ve çoğunlukla sıcak çatlaklar bu bölgede oluşur.



Şekil 2.17. Ergime bölgesindeki tanelerin durumu.

Metalik malzemeler bir kaynak işlemi gördükleri zaman kaynak dikişine (ergime bölgesi) bitişik olan bölge, kaynağa uygulanmış olan sıcaklık derecesinin etkisi altında kalır. Kaynağa uygulanan sıcaklık derecesinin daha doğrusu ısı çevriminin etkisi altında kalarak, içyapı değişikliğine uğrayan ergime bölgesine bitişik olan bu bölgeye “ısıdan etkilenmiş bölge (IEB)” adı verilir. IEB ergitme kaynağının bir sonucu olup kaçınılması olanaksızdır; boyutları ise kaynak sırasında uygulanan ısı girdisine, soğuma hızına, parça boyutlarına ve malzemenin ısı iletim katsayısına bağlı olarak değişir. Bu etkenlerden değiştirilmesi olanaklı olanlar yardımı ile IEB bir dereceye kadar kontrol altına alınabilir.

Kaynak sırasında IEB bölgesinde önce hızlı bir ısınma ve sonrasında malzeme kalınlığına ve uygulanan ısı girdisine bağlı olarak hızlı bir soğuma oluşur. Çeliğin bileşimine göre, sertleşme eğilimi olan çeliklerde soğuma hızı kritik soğuma hızını aştığı anda genellikle IEB bölgesinin 900 °C 'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkmış olan bölgelerinde martenzitik karakterde sert ve kırılgan bir yapı ortaya çıkar. Bu bölge bağlantının en zayıf bölgesi olup birçok çatlama ve kırılma bu bölgede meydana gelir. Karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde kaynak sırasında oluşan ısı değişimlerinin yarattığı en önemli etki, malzemenin ısıdan etkilenen bölgesinin sertleşme derecesine bağlı olarak, tokluk mukavemetinin ve hidrojen gevrekliğinin olumsuz yönde değişmesidir. Sertlik ve sertleşebilme kabiliyeti anlam olarak birbirlerinden çok farklı iki kavramdır. Sertlik genel olarak çeliğin içerdiği C miktarının bir fonksiyonudur. Sertleşebilme kabiliyeti ise, çeliğin ostenit bölgesinden itibaren ani olarak soğutulması sonucu ortaya çıkan martenzitik yapının oluşma kolaylığının bir ölçüsüdür. Sertleşebilme kabiliyeti düşük çelikler ancak kaynak işlemini takiben çok şiddetli bir şekilde soğutulduklarında

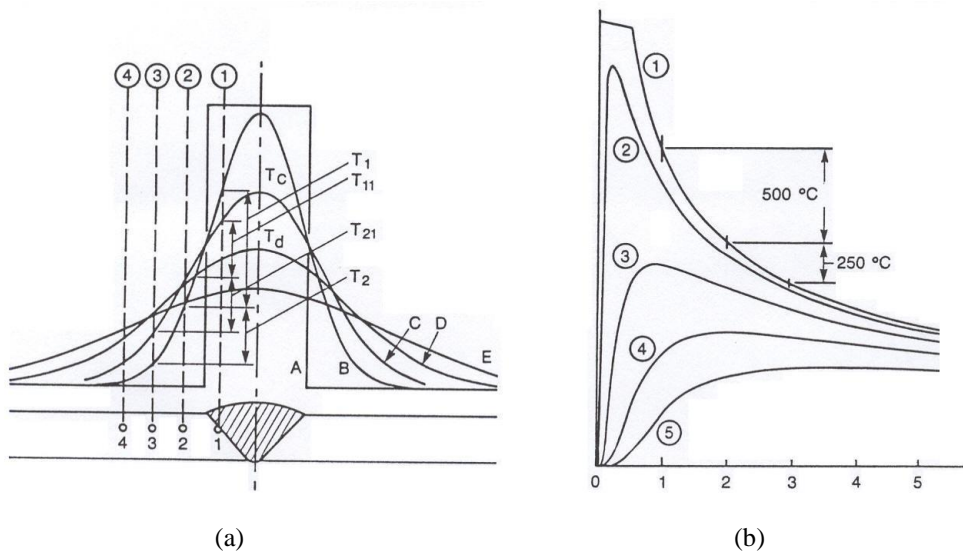
martenzitik yapı oluştururlar. Sertleşebilme kabiliyeti yüksek çelikler ise, çok yavaş soğutuldukları durumda bile martenzitik yapıya dönüşebilirler. Çeliklerin kaynağında, ısıdan etkilenmiş bölgenin içyapısı tane büyüklüğü açısından iri taneli bölge, ince taneli bölge, kısmen dönüşmeye uğramış bölge ve içyapı değişikliğine uğramamış bölge olmak üzere dört farklı bölge yapısı içerir. İri taneli bölge, ergime bölgesine bitişik olan ve kaynak sırasında 1150-1450 °C sıcaklığa kadar ısınan bölgedir. Bilindiği gibi, metaller yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklık derecelerinde ısıtıldıklarında tane büyümesi oluşmaktadır. Bazı taneler büyüyerek kısmen ya da tamamen küçük tanelerin yerine geçer. Tane büyüme hızı sıcaklık arttıkça artar ve metalin solidüs sıcaklığına yaklaştıkça büyüme oldukça hızlanır. İri taneli yapılar, ince taneli yapılara karşın daha gevrek ve kırılgan olduğu için istenmeyen bir durumdur.

Çeliklerde kaynak sırasında, ergime sınırına bitişik olan esas metal solidüse yakın bir sıcaklığa eriştiğinden ostenit içindeki tane büyümesi oldukça fazladır. İnce taneli bölge, kaynak sırasında 900 ile 1150 °C arasında bir sıcaklığa kadar ısınan bölgedir. Bu bölgede tane büyümesine rastlanmaz; ancak, ostenit oluştuğundan soğuma anındaki soğuma hızı ve çeliğin bileşimine bağlı olarak aynen iri taneli bölgede görülen içyapıya benzer bir yapı görülür. Kısmen dönüşmüş bölge, kaynak işlemi sırasında A₃ ile A₁ arası sıcaklığa kadar ısınmış olan bu bölge kısmı bir ostenitizasyona uğramış olup, yapısındaki ostenit miktarına bağlı olarak ilk iki bölgeyi andıran bir içyapı gösterir. A₁ 'in altındaki sıcaklık derecesine kadar ısınmış olan bölgelerde ise içyapı değişikliği oluşmaz.

2.4.2. Kaynak sırasında oluşan ısıl çevrimler

Çeliklerin kaynağında, IEB özelliklerinin önceden belirlenebilmesi için kaynak edilen malzeme bileşiminin, malzemenin kaynak öncesi uğradığı ısıl çevrimlerin, kaynak sırasındaki sıcaklık dağılım ve değişiminin bilinmesi gerekir. Kaynak işlemi sırasında meydana gelen ısıl değişimler nedeni ile kaynağın malzeme üzerinde yarattığı etkileri daha iyi tahmin edebilmek için ısıl çevrim hakkındaki bazı faktörlerin iyi bilinmesi gerekir. Bu faktörler, ısıtma hızı, tepe sıcaklığı,

sıcaklık dağılımı, tepe sıcaklığına maruz kalınan süre ve ısınan bölgelerin soğuma hızıdır. Söz konusu bu faktörlerden ısıtma hızı ve tepe sıcaklığının etkisinde kalınan süre özellikle elektrik ark kaynağında çok dar bir alan içerisinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, kaynak bölgesindeki sıcaklığın dağılımı ve değişimi incelenirken yalnız erişilen tepe sıcaklık derecesi ve soğuma hızı göz önünde bulundurulur. Kaynak işleminde, gerek malzemenin kaynak edilmesi sırasında gerekse soğuma sırasında malzeme içinde sürekli bir ısı yayılımı söz konusudur. Şekil 2.18-a 'da A-eğrisi ısı yayılımının söz konusu olmadığı durumu temsil etmektedir. Burada, kaynak bölgesindeki sıcaklık malzemenin ergime sıcaklık derecesinin üstünde olup, esas metalde herhangi bir sıcaklık artışının olmadığı kabul edilmiştir (Linnert 1994). Ancak, bu çok gerçekçi bir yaklaşım değildir. Enerji girdisinin aniden kesilmesi durumunda (B-eğrisi), kaynak bölgesindeki ısının daha soğuk olan esas metale doğru aktığı ve kaynak bölgesindeki tepe sıcaklığının düştüğü görülecektir. Benzer durum C-eğrisi içinde söz konusudur. 1 no'lu bölgedeki sıcaklık ergimiş metalden esas metale doğru oluşan ısı akışının etkisi ile hemen hemen ergimiş bölge sıcaklığına eşittir. Ergime bölgesinden uzaklaştıkça malzeme sıcaklığı düşmektedir. 2 no'lu bölgedeki sıcaklık 1 no'lu bölgedeki sıcaklığın yaklaşık 1/3 'ü kadar olup benzer durum 3 ve 2 no'lu bölgeler içinde söz konusudur.



Şekil 2.18. a) Kaynak bölgesindeki ısınma eğrisi (Linnert 1994).
b) IEB bölgesindeki ısı yayılımı (Linnert 1994).

4 no'lu bölgede ise sıcaklık artışı yoktur. Tepe sıcaklığın derecesi ısı akışında oldukça etkin bir rol oynar. B-eğrisinde 1 ve 2 noktaları arasındaki sıcaklık düşümü T_1 °C iken, C-eğrisindeki sıcaklık düşümü bundan çok daha azdır (T_{11} °C). Sıcaklık dağılımının soğuma üzerindeki etkisi, Şekil 2.18-b 'de ki diyagram yardımıyla daha kolay görülmektedir. Kaynak sırasındaki ısı girdisi nedeni ile 1 no'lu bölgenin sıcaklığı ergime noktasının üzerine çıkarak bu bölge ergimiş hale geçmekte ve sonrasında da soğuma olayı gerçekleşmektedir. Burada, ergimiş bölge ile esas metal arasındaki sıcaklık farkı çok yüksek olduğu için ısı girdisinin sona erdirilmesi ile çok hızlı bir soğuma meydana gelmektedir. 2 no'lu eğriye bakıldığında, bu bölgede ulaşılan tepe sıcaklığının 1 noktasındaki sıcaklığın hemen altında bir değerde olduğu görülmektedir. 3 ve 4 noktalarında ise ısınma olayı ısı yayılımı sonucu gerçekleştiğinden, 1 ve 2 no'lu bölgelerin soğuma sürecine geçmesi ile birlikte başlamaktadır. Sonuç olarak, en yüksek soğuma hızının, sıcaklığın en yüksek olduğu noktada olduğu görülmektedir. Ayrıca, kaynak noktasından uzaklaştıkça hem tepe sıcaklığı düşmekte (dolayısıyla ısıtma ve soğutma hızları da azalmaktadır) hem de tepe sıcaklığına ulaşmak için gereken süre gereksinimi artmaktadır.

2.4.2.1. Isı girdisi

Ergitme kaynağında ısı kaynağının temel görevi metali ergitmektir. İyi bir kaynak bağlantısının elde edilebilmesi için, ısı kaynağının yeterli enerjiyi üretebilmesi gereklidir. Ark enerjisi olarak ta tanımlanabilecek olan bu enerji, hem esas metalde yeterli ergimeyi oluşturacak kadar yüksek hem de IEB bölgesinde istenmeyen mikro yapı değişimlerine yol açmayacak kadar düşük olmalıdır. Metalürjik nedenlerden dolayı, hem ergitilecek malzeme miktarı minimum düzeyde tutulmalı hem de malzeme minimum enerji girdisi ile ergitilmelidir. Isı girdisinin artması ile kaynak metali ile IEB bölgesinin tokluk ya da mukavemet değerlerinde bozulmalar oluşur. Ark kaynağında, akım üretici tarafından üretilen ark enerjisi Denklem 2.15 ile verilen formüle göre belirlenir. Ancak, arktaki kayıplar nedeni ile üretilen bu enerjinin tamamı malzemeye aktarılamaz. Birim kaynak uzunluğu boyunca ark tarafından üretilen enerjinin bir kısmı ışımaya yolu ile

çevreye yayılır yani iş parçasına aktarılamaz. Tozaltı kaynağında, kaynak banyosu üzerindeki koruyucu toz örtüsü sayesinde ark enerjisinin %90-99 ‘u faydalı enerji olarak iş parçasına aktarılmaktadır. Uygulamada birim kaynak uzunluğundaki enerji kullanımı olarak da ifade edilebilecek olan “ısı girdisi” kavramı daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Denklem 2.16). Burada, H_{net} net ısı girdisini (J/mm), I kaynak akımını (A), E ark gerilimini (V), S kaynak hızını (mm/s) ifade etmekte olup, f_1 ise ark verimi olup boyutsuz bir katsayıdır. Tozaltı kaynağı için ark verimi 0,99 olarak kabul edilebilir. İş parçasına aktarılan bu ısı girdisinin (H_{net}) ise yalnız bir bölümü malzemenin ergimesi için harcanmaktadır. Burada ise, karşımıza ergime etkinlik katsayısı (f_2) çıkmaktadır. f_2 malzemenin ergimesi için gerekli olan minimum enerji miktarının, malzemeye aktarılan toplam enerji miktarına (H_{net}) oranıdır (AWS 2001). Ergime etkinlik katsayısı Denklem 2.17 ‘ye göre hesaplanabilir. Burada, H_f ergime ısısı, C spesifik ısı, T_m ana metalin ergime sıcaklığı, T_o ana metalin kaynak öncesi sıcaklığı, A kaynak dikişinin kesit alanı (mm^2) ve γ ise kaynak metalinin yoğunluğu olup, çelikler için $H_f = 274000$ J/kg, $C = 670$ J/kg ve $\gamma = 7,8 \times 10^{-6}$ kg/mm³ olarak alınabilir.

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

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

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

2.4.2.2. Tepe sıcaklığı

Tepe sıcaklığı kaynak sırasında meydana gelen ısı değişimleri etkileyen en önemli etkendir. Kaynak işlemi sırasında malzemede ulaşılabilecek olan tepe sıcaklığı, ısı girdisine ve ısı kayıplarına bağlı olarak değişir. Isı girdi hızı, ısı kayıpları hızından yüksek olduğu sürece malzeme sıcaklığı yükselir. Her ikisinin birbirine eşit olduğu anda malzeme tepe sıcaklığına erişmiş olur. Kaynak metalinde ulaşılan tepe sıcaklık derecesi aynı zamanda IEB bölgesindeki tane boyutları üzerinde de etkin bir rol oynar. Isı girdisi hem kaynak metalinin ergimesini hem de ergimiş bölgeden esas metale doğru oluşan ısı yayılımını karşılayacak düzeyde olmalıdır. Kaynak hızı artırıldığı zaman yeterli ergimeyi sağlayabilmek için ısı girdisini de

yani kaynak akım şiddetini arttırmak gerekir. Akım şiddetinin artması, kaynak bölgesindeki tepe sıcaklığının bir miktar yükselmesine neden olur. J.R.Adams tarafından geliştirilen, alın kaynaklı sac ve plakalarda tam nüfuz etmiş tek bir paso için kaynağa bitişik ana metalde tepe sıcaklığının dağılımının formülü Denklem 2.18 'de verilmiştir (Easterling 1983). Bu formülde $Y=0$ olduğunda, yani tam ergime sınırında, denklem $T_p=T_m$ vermektedir. Bu sonuç doğru olarak kabul edilebilir, zira kaynak ergime sınırında tepe sıcaklığı ergime sıcaklığına eşittir. Bu formül kaynak metali için değil yalnız IEB bölgesi için geçerli olup, IEB bölgesindeki belirli noktalardaki ulaşılan tepe sıcaklığını belirlenebilmesi, IEB genişliğinin önceden saptanabilmesi ve IEB genişliği üzerinde ön ısıtmanın etkisinin hesaplanabilmesi amacı ile kullanılabilir. Burada, T_p tepe sıcaklık derecesini ($^{\circ}\text{C}$), T_0 iş parçasının başlangıç sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_m malzemenin ergime sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), H_{net} ısı girdisini (J/mm), t malzeme kalınlığını (mm) ve Y esas metal üzerindeki noktanın erime bölge sınırına olan uzaklığını (mm) ifade eder.

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \rho C t Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (2.18)$$

2.4.2.3. Soğuma hızı

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

Demir normal sıcaklıklarda hacim merkezli kübik kristal kafes yapısında olup, bu halini 911 °C 'ye kadar korur. Demirin bu haline α -demiri (ferrit) denir. Bu sıcaklıktan sonra, yüzey merkezli kübik kristal yapısındaki γ -demirine (ostenit) 1392 °C 'den sonra ise tekrar hacim merkezli kübik kristal yapısında olan δ -demirine dönüşür. Ostenitte bol miktarda çözünen karbon ve diğer alaşım elementleri, soğuma sırasında ferrite geçerken ayrışmak zorundadırlar. Çözünmüş olan bu alaşım elementlerinin ferrite geçerken ayrışmalarını engelleyecek kadar hızlı bir soğuma olduğunda, hem bu ayrışmalar engellenebilir hem de normal ostenit-ferrit dönüşümü bozulup olay ostenit-martenzit dönüşümüne çevrilebilir.

Martenzitik içyapı demirin dengesini bozan bir yapıdır. İçinde çözünmeyen elementlerin sıkışıp kaldığı ve çıkamadığı bir ferrit kafesidir. Demir atomları zorla olmak istemedikleri yerlere itilmiş ve her atom etrafında gerilmeli bir durum yaratılmıştır ve demir böylece sertleşmiştir. Çeliğin bileşimindeki karbon miktarı ve/veya diğer alaşım elementlerinin miktarı artıca çeliğin sertleşebilme kabiliyeti de o oranda artar. IEB bölgesinde martenzit oluşumuna olanak vermeyen bir soğuma hızının seçilerek kaynak yapılması son derece önemlidir (Anık 1975).

Kaynak bölgesinin soğuması özellikle çeliğin kendi soğuk bölgesine ısı iletimi ile yani ısının çelik tarafından çekilmesiyle yani "soğrulmasıyla" olur. Kaynak edilen parça ne kadar kalın ise, soğrulma miktarı artacak ve soğuma hızı yükselerek IEB bölgesinde sertleşme ve dolayısıyla martenzitik yapı oluşabilecektir. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, IEB bölgesinde 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkmış olan kısımların dönüşüm açısından 800 ile 500 °C arasındaki soğuma hızı ile aşağı yukarı aynı hızda soğumaktadır. Bu nedenle, karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için, soğuma sırasında IEB bölgesindeki en kritik soğuma bölgesi 800 ile 500 °C arasındaki kısım olup, soğuma hızı bu sıcaklık aralığındaki süre için tanımlanan bir değerdir. Bu değer küçük olduğu durumda, soğuma hızlı olmuş demektir. Soğuma süresinin azalması sertliğin ve mukavemetin artmasına, buna karşın çatlama eğiliminin yükselmesine neden olur. Soğuma süresinin büyük olduğu durumda, soğuma yavaş olmuş demektir. Diğer bir deyişle, ısı girdisinin fazla olması söz konusudur. Bu durumda, tane büyümesi oluşarak malzemenin

çekme mukavemeti, akma sınırı gibi mekanik özelliklerinde azalma oluşur. Soğuma süresinin hesaplanmasında, parça kalınlığına bağlı olarak iki ve üç boyutlu ısı iletimi göz önüne alınır. Kalın parçaların kaynağında, ısı hem parça düzleminde hem de parça kalınlığı doğrultusunda yayılırken (üç boyutlu ısı iletimi), ince parçalarda ısı iletimi sadece parça düzleminde (iki boyutlu ısı iletimi) oluşur. Bu nedenle, kalın parçalarda parça kalınlığı soğuma üzerinde etkili olmazken iken ince parçalarda bu etki görülmektedir (Şekil 2.19). İki ve üç boyutlu ısı iletimine göre soğuma süresine ait bağıntılar, gerekli kabuller ve düzenlemeler yapılarak Rosenthal ve Rykalin'in katı cisimlerde hareketli noktasal ısı kaynağının varlığını kabul ederek, kaynak bölgesindeki sıcaklık akışı yer ve zamanın bir fonksiyonu olacak şekilde ısı iletimi diferansiyel denklemlerinden geliştirilmiştir. Buna göre, üç boyutlu ve iki boyutlu ısı iletimi için soğuma süresi sırasıyla Denklem 2.19 ve 2.20 'de verildiği gibidir (Yüksel ve Can 1989).

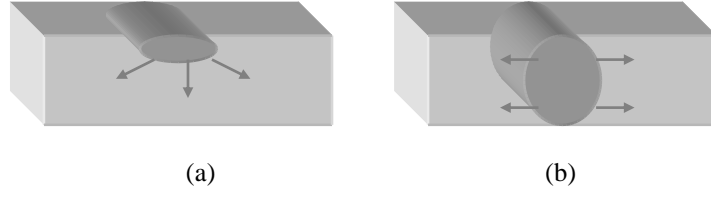
Burada, $t_{8/5}$ 800 ile 500 °C arasındaki soğuma süresini (sn), η bağıl termik verimi, E net ısı girdisini (J/cm), F_2 ve F_3 sırasıyla iki ve üç boyutlu ısı iletiminde dikiş faktörünü, λ çeliğin özgül ısı iletkenliğini, ρ çeliğin yoğunluğunu, c çeliğin özgül ısısını, d malzeme kalınlığını (cm) ve T_0 ortam veya ön ısıtma sıcaklığını (°C) ifade etmektedir. Kaynak yöntemine bağlı olarak alınan bağıl termik verim, tozaltı kaynağı için $\eta=1$ 'dir. Kaynak dikiş faktörü (F_2 ve F_3) ise, kaynak ağzı yoksa 1, kaynak ağzı açılmış ise 0,9 olarak alınır. Alaşımız ve az alaşımlı çelikler için, $\rho=7,85 \text{ gr/cm}^3$, $\lambda=0,24 \text{ J/s.cm}^\circ\text{C}$ ve $c=0,9 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$ ' dir.

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

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

İki boyutlu ısı iletimi (ince parça) için soğuma süresi;

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



Şekil 2.19. a) Üç boyutlu ısı iletimi (kalın parça).
b) İki boyutlu ısı iletimi (ince parça).

İki boyutlu ısı iletiminden üç boyutlu ısı iletimine geçişi gösteren kalınlığa (d_g) geçiş kalınlığı adı verilir ve 2.19 ile 2.20 denklemlerinin eşitlenip düzenlenmesi ile elde edilir (Denklem 2.21)

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

Isı iletiminin türüne, parça kalınlığının geçiş kalınlığı ile karşılaştırılması sonucunda karar verilir. Buna göre, malzeme kalınlığı geçiş kalınlığından küçük ise iki boyutlu ısı iletimi, aksi durumda ise üç boyutlu ısı iletimi söz konusudur (DVS 1987). Bir diğer yol ise, her iki ısı iletimine göre soğuma süresinin hesaplanarak ısı iletim türünün ne olduğuna karar vermektir. Her iki değerden büyük olanı fiziksel olarak daha anlamlıdır (Anık ve Bodur 1979). Bu nedenle, denklem 2.19'dan elde edilen değer daha büyükse ısı iletimi üç boyutlu aksi halde ise iki boyutlu demektir.

Malzeme kalınlığı ve ısı girdisine bağlı olarak soğuma süresini, Şekil 2.20 'de verilen nomogram yardımı ile hesaplama olanağı vardır. Soğuma hızı denklemlerinden görülmektedir ki, ana metalin başlangıç sıcaklığı, uygulanan enerji girdisi, kullanılan kaynak yöntemi, kaynak pozisyonu, malzeme kalınlığı ve kaynak ağzı biçimi soğuma hızına etki eden faktörlerdir. Ergime bölgesindeki soğuma hızının belirlenmesi, ergime ve IEB bölgesindeki metalürjik dönüşümlerin kontrol altına alınması (özellikle, martenzitik yapı dolayısıyla soğuk çatlak oluşumunun önüne geçilmesi) ve kaynak metalindeki tane büyümesinin engellenmesi açısından oldukça önemlidir.

ısı girişi (J/mm) kJ/in.		soğuma süresi t_{8-5} (sn)	kalınlık (mm)
(7880)	200	600	3.2
(5910)	150	400	4.0
		300	4.8
(3940)	100	200	6.4
(3152)	80	150	8.0
		100	9.5
		80	
		60	
(2364)	60	40	11.1
		30	
(1970)	50	20	12.7
		15	
(1576)	40	10	14.3
		8	
(1182)	30	6	15.9
		4	17.4
		3	19.0
		2	25.4
(788)	20		
(591)	15		

Şekil 2.20. Kalınlık, ısı girişi ve soğuma süresi arasındaki ilişki (Linnert 1994).

J.R. Adams 'ta diğer araştırmacıların yaptığı gibi soğuma oranı hesaplarını ince ve kalın parçalar için ayrı ayrı yapmıştır. İki boyutlu ısı iletimi (ince parça) için soğuma hızı Denklem 2.22 'de, üç boyutlu ısı iletimi (kalın parça) için soğuma hızı ise Denklem 2.23 'de verilmiştir. Burada, Rc_2 ve Rc_3 sırasıyla iki ve üç boyutlu ısı iletiminde kaynak orta eksenindeki soğuma hızı ($^{\circ}C/s$), T_c soğuma hızının hesaplandığı sıcaklıktır ($550^{\circ}C$). Isı iletim türünün belirlenmesi sınır parça kalınlığına (Denklem 2.24) bağlı olarak yapılır. Eğer, $\tau < 0,75$ ise iki boyutlu ısı iletimi, $\tau > 0,75$ ise üç boyutlu ısı iletimi söz konusudur (Yung et al 1997).

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

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

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

2.4.2.4. Karbon eşdeğeri

Kaynak işlemi sırasında, ergime bölgesine bitişik olan esas metalin ısı çevrime uğraması sonucunda belirli bir sertlik artışına uğradığı daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Burada ki sertlik artışına etki eden en önemli faktör, ana metalin kimyasal bileşimidir. Alaşımless çeliklerin sertleşme kabiliyetleri üzerinde oldukça etkin olan başlıca elementler C ve Mn'dır. Az alaşımlı çeliklerde ise, Cr, Mo, V ve Mn gibi alaşım elementleri düşük C oranlarında bile kaynak sonrası IEB bölgesinde sertlik artışına neden olurlar. Kaynak sırasında çeliğin sertleşme eğilimini belirten bir değer sayısının bulunması ve bununla çeliğin bileşimine dayanarak, kaynak kabiliyetini belirten bir formülün elde edilmesi için birçok çalışma yapılmış ve alaşım elementlerinin verdiği sertleşmeye eşdeğer sertliği sağlayacak C miktarı saptanmıştır. Bu şekilde saptanan ve çeliğin bileşimindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu sertliği veren C miktarına karbon eşdeğeri ($C_{eş}$) adı verilmiştir (Gülsöz ve Meran 1997).

Günümüze kadar bu konuda birçok çalışma yapılmış ve oldukça fazla sayıda karbon eşdeğeri formülü geliştirilmiştir; ancak, bunlardan en yaygın olarak kullanılanı Uluslararası Kaynak Enstitüsü Kaynak Kabiliyeti Komisyonuna (IIW) göre düzenlenmiş olan formüldür (Yüksel 1996). Denklem 2.25 'de verilen bu karbon eşdeğeri formülünün geçerli olabilmesi için çelikteki alaşım elementlerinin sınırı Tablo 2.6'daki gibi olmalıdır. Bunun dışında, boru çelikleri için Mannesmann tarafından geliştirilmiş olan CE_{PLS} formülü ile (Denklem 2.26), %0.15 'den daha az C içeren boru çelikleri için Ito and Bessyo tarafından geliştirilmiş olan P_{CM} formülleri (Denklem 2.27) çelik boru sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Casti 2002). Görüldüğü gibi, karbon eşdeğeri formülü tamamen çeliğin kimyasal bileşimi ile ilgili olup, malzemeye uygulanan ısı girdisi, malzeme kalınlığı, kaynak ağzı biçimi gibi faktörleri içermemektedir.

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

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

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

Tablo 2.6. C_{eş}(IIW) için çeliklerdeki alaşım elementlerinin üst sınırı.

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

Tablo 2.7. C_{eş} 'e göre ön tav sıcaklığının belirlenmesi.

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

Tablo 2.8. Ön tav işlemi uygulanmadan kaynak edilebilecek maksimum parça kalınlığı değerleri.

Akma sınırı (N/mm ²)	Maksimum kalınlık (mm)
315 – 355	30
385 – 420	20
460 – 500	12
> 590	8

Uluslararası Kaynak Enstitüsü çatlama karşı bir emniyet olarak kaynak sonrası IEB bölgesindeki sertliğin 350 HV 'yi aşmamasını önermektedir. IEB bölgesinde sertlik artışını kontrol edebilmek için yaygın olarak yapılan uygulama, kaynak öncesi parçaya ön tav yapılması ve kaynak işleminin bu sıcaklık derecesinde gerçekleştirilmesidir. Bir yapı çeliğine uygulanacak olan ön tavlama karbon eşdeğerine bağlı olarak belirleyen bazı formüller geliştirilmiş olsa da en emin yol Tablo 2.7'de verilmiş olan değerleri uygulamaktır. İnce taneli yapı çeliklerinin kaynağında +5 °C'nin altındaki sıcaklıklarda parçaya 80-200 °C'lik bir ön tav uygulanır. Bu sıcaklığın üzerindeki çalışmalarda, parçaya ön tav uygulanıp uygulanmama konusunda malzemenin akma sınırı ve parça kalınlığı bir ölçüt olarak kullanılır (Tablo 2.8).

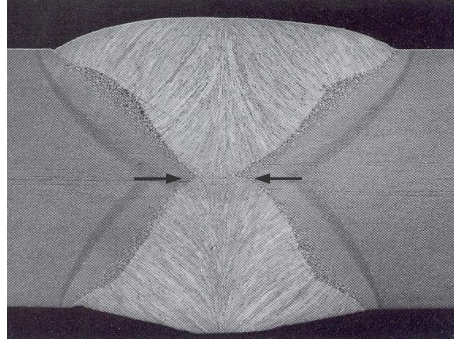
Kaynak kabiliyeti bakımından çelikleri üç ayrı grupta değerlendirme olanağı vardır; iyi bir kaynak kabiliyetine sahip olan çelikler, bilinen tüm kaynak yöntemleri ile hiç bir özel önlem gerektirmeksizin kaynak edilebilirler. IEB bölgesinde tane büyümesi dışında bir yapı değişikliği ve sertleşme oluşmaz. Bu özellik, genellikle $C_{eş} < 0,45$ olan çeliklerde vardır. Orta derecede kaynak kabiliyetine sahip olan çeliklerde güvenli bir kaynak bağlantısı elde edebilmek için, kaynak yöntemi ve malzeme seçimine dikkat edilmeli ve uygun bir ön tav sıcaklığı uygulanmalıdır. Bu gruba giren çeliklerin karbon eşdeğeri $0,45$ ile $0,60$ arasındadır. Kötü derecede kaynak kabiliyetine sahip olan çelikler ($C_{eş} > 0,1$ olan yüksek alaşımlı ve karbonlu çelikler) ise, özel ek kaynak metali kullanılarak, oldukça yüksek bir ön tav sıcaklığı ve kontrollü bir soğutma ile kaynak edilirler. Genellikle, IEB bölgesindeki sertlik değeri garanti edilmez.

2.5. Tozaltı Kaynağında Oluşan Kaynak Hataları

Tüm kaynak yöntemlerinde olduğu gibi tozaltı kaynağında da, kaynak parametrelerinin uygun seçilmemesi, uygun olmayan ek kaynak metali veya kaynak tozu kullanımı ve kaynak tekniğinin kötü uygulanması sonucunda istenmeyen bir dizi kaynak hatası ile karşılaşılması olasıdır. Tüm kaynak hataları, kaynak dikişinde bir zayıflama ve süreksizlik oluşturarak bağlantının kullanım sırasında geri dönüşü olanaksız çatlak, kırılma ya da performans eksikliğine neden olabilir. Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde en çok karşılaşılan hata türleri; gözenek, yanma oluşu, kalıntı, nüfuziyet yetersizliği, çatlak oluşumu ile geometrik (bindirme, dikiş kaçıklığı vb.) gibi hatalardır

2.5.1. Nüfuziyet yetersizliği

Nüfuziyet başarılı bir kaynağın temel koşuludur ve nüfuziyet esas olarak kaynak bağlantısındaki ergime derinliğidir; yani, esas metalin ilk yüzeyi ile ergimenin bittiği noktalar arasındaki mesafedir. Kaynak sırasında, ergimenin bütün malzeme kalınlığınca aynı olmaması sonucunda bağlantının alt kısımlarında kırılmaya neden olabilecek oyuk ve çentikler oluşur (Şekil 2.21).



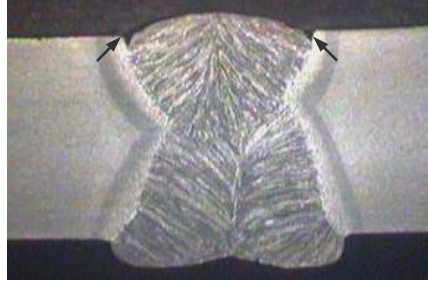
Şekil 2.21. Nufuziyet yetersizliği

Nufuziyet yetersizliği özellikle dikişin yorulma mukavemetini önemli bir ölçüde düşürür ve dikiş eğilmeye zorlandığında kökteki oyuk ve çentikler bağlantının kırılma eğilimini arttırarak, bağlantının bu kısımdan çatlmasına ve sonrasında kırılmasına yol açar. Tek pasolu alın kaynağında nufuziyet derinliği, malzeme kalınlığının %80'ni geçerse kaynak sırasında malzemenin delinme tehlikesi artar. Gereğinden kalın bir tel kullanılması durumunda ya da düşük akım şiddeti ile çalışılması halinde nufuziyet derinliği azalır ve nufuziyet yetersizliği oluşabilir. Ayrıca, kaynak ağzının hatalı açılması da bu hataya yol açabilir.

2.5.2. Yanma oluşu (çentik)

Bu hata, kaynaktan sonra esas metalde veya kaynak metalinde oyuk veya çentik biçiminde kendisini gösterir. Söz konusu bu oluklar dikiş boyunca sürekli veya kesintili bir şekilde devam eder (Şekil 2.22). Yanma olukları, kaynak dikiş kesitini zayıflattıklarından ve çentik etkisi yaptıklarından dolayı, özellikle dinamik zorlanmaların etkisinde kalan bağlantılarda bulunmaları istenmez. Bütün ark kaynak yöntemlerinde karşılaşılan yanma oluşunun oluşum nedenleri şu şekilde sıralanabilir;

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



Şekil 2.22. Yanma oluğu

2.5.3. Gözenek oluşumu

Çok çeşitli nedenlerle oluşabilen gözenekler kaynak banyosunda sıkışıp kalan gazların oluşturduğu boşluklardır. Bunlar gaz kabarcığı denilen tek tek yuvarlak veya gaz kanalı olarak adlandırılan uzunlamasına boşluklar halinde dikiş içinde yer alırlar (Şekil 2.23). Bir kaynak dikişinin içinde bulunan gözenekler, dikişin taşıyıcıyı kesitinin azalmasına yol açtığından dolayı mukavemet değerlerini düşürür ve aynı zamanda yerel gerilme birikimlerine neden olur. Bu durumda bağlantının mekanik özelliklerinin kötüleşmesine yol açar. Gözenekler, özellikle yorulma mukavemetini azaltıcı yönde etki gösterirler. Kaynak metali içinde dağılmış olarak bulunan küçük gözenekler birleştirmenin statik mukavemetini çok fazla etkilemezler. Ancak, yüksek dinamik mukavemet istenen yapılarda gözenek oluşumuna izin verilmez (Lincoln Electric 1989). Tozaltı kaynağında, gözenek oluşumuna neden olan etkenleri kısaca aşağıdaki gibi açıklamak olasıdır;


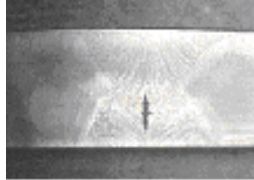
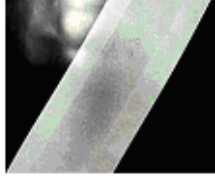


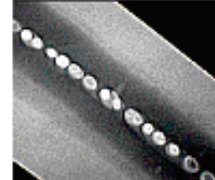


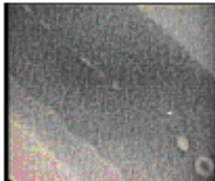
1. Yüksek kükürt içerikli kaynağa yatkın olmayan çelik kullanımı,
2. Uyumsuz tel ve toz birleşimi ile çalışılması,
3. Serbest tel ucunun fazla uzun olması. Deneyimler temas memesi ile iş parçası arasındaki uzaklığın kısılması ile daha kararlı ve sabit bir arkın elde edildiğini göstermiştir. Tel eğiminin uygunsuz olması da gözenek oluşumuna yol açar.
4. Kaynak tozunun nemli olması nedeni ile kaynak banyosuna nem taşınması,
5. Çok yüksek veya çok düşük ark gerilimi ile çalışılması,
6. Kaynak hızının aşırı yüksek olması ya da ısı girdisinin düşük olması nedeni ile gazların kaynak banyosundan dışarıya çıkacak zamanı bulamadan kaynak metalinin katılaşması ve gazların katılaştıran kaynak metali içinde hapis olmasıdır.

Diğer bir ifade ile hızlı soğuma durumunda, gazların (H_2 , CO , N_2 veya H_2O) yüzeye çıkmasının engellenmesi ile katılaştan kaynak metalinde kalmaları ile gözenek türü kaynak hatası oluşur.

7. Toz yüksekliğinin uygun olmaması. Kaynak yaparken yığılan tozun yüksekliği, arkı tam örtecek şekilde ayarlanmalıdır. Eğer, yığılan tozun yüksekliği az ise dikiş gözenekli olur. Tozun yüksekliğinin fazla olması halinde de, gazların dikişten dışarıya çıkması zorlaşır; bu da, gözenek oluşumuna neden olur.

8. Tel, toz veya iş parçasının yüzeyinin kirli olması. Yağ, gres ve boya gibi organik kalıntılarla ile pas ve tufal gibi metalik kalıntılar da gözenek oluşumuna neden olurlar. Bu nedenle, kullanılan kaynak tozunun içinde toz, pislik, tufal ve demir tozu gibi kalıntılar bulunmamalıdır. Bu amaçla, kaynak tozu sürekli bir eleme ve temizlemeye tabi tutulur. Kaynak ağzlarında giderilemeyen bir kalıntı olması halinde, kaynak hızı düşürülerek gazların kaynak banyosu katılaştıncaya kadar dışarıya çıkabilmesi için yeterli zaman oluşturulur. Bu gibi durumlarda, yüksek miktarlarda dezoksidasyon elementi içeren kaynak telleri de kullanılabilir.

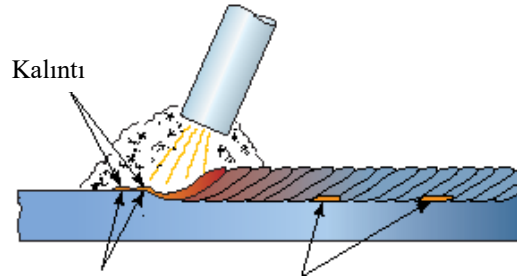
9. Ark üflemesi de gözenek oluşumuna yol açar.

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

Şekil 2.23. Gözenek türü kaynak hataları (Güloğlu 2003).

2.5.4. Kalıntılar

Kalıntılar gerek kaynak kesitini zayıflatmaları gerekse de çatlak başlangıcına neden olduklarından varlıkları arzu edilmez. Ergimiş kaynak banyosunu dezokside etmek ve yabancı maddelerden arındırmak amacı ile kaynak tozu içinde bulunan elementler kaynak süresince oksitler, nitrürler ve yabancı maddelerle reaksiyona girerler. Normalde cüruf olarak adlandırılan bu bileşikler düşük yoğunlukları ve katılma sıcaklıkları nedeni ile kaynak işlemi süresince yüzeye doğru hareket ederler ve yüzeyde cüruf tabakası oluştururlar (Şekil 2.24). Hızlı soğuma durumunda (yetersiz ısı girdisi), cüruf kalıntısı kaynak banyosunun erken katılması nedeni ile metal yüzeyine ulaşamaz ve dikişin içinde kalarak hata yaratır (Şekil 2.25). Kaynak telinin doğrultmasında problem olması, telin kaynak noktasına kesintili bir biçimde gelmesi, uygun olmayan kaynak ağız tasarımı ile tufal, pas ve yağ gibi yabancı maddelerin varlığı kalıntı oluşumunu artıran etkenler arasındadır. Cürufun elektroda doğru akması da cüruf kalıntısına neden olur. Ancak, bu durumda soğuma hızının artırılması yani daha hızlı bir soğumanın sağlanması gerekir. Ayrıca, daha az akıcı ve iri taneli toz kullanımı tercih edilir ve kaynak ağız açısı büyütülür.



Şekil 2.24. Kalıntı türü hatanın oluşumu.



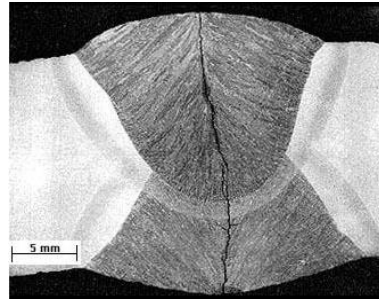
Şekil 2.25. Kalıntı türü kaynak hatasının görünümü.

2.5.5. Çatlak oluşumu

Bu hata diğer hatalara karşın en tehlikeli olanıdır (Şekil 2.26). Dış zorlamaların türü ne olursa olsun çatlaklar sürekli olarak bağlantının mukavemet değerini düşürür; bu bakımdan, kaynak dikişinde çatlağa hiç bir şekilde izin verilmez. Çatlağın oluştuğu yer, çatlak oluşum nedeni ile ilgili olarak önemli ipuçları vermektedir. Ergitme kaynağında çatlağa kaynak metalinde (genellikle sıcak çatlak) ve ısıdan etkilenmiş bölgede (genellikle soğuk çatlak) rastlanır. Çatlaklar oluşum zamanlarına göre “sıcak çatlak” ve “soğuk çatlak” olmak üzere iki gruba ayrılır. Sıcak çatlaklar, kaynak banyosu katılaşmaya başladığı anda, soğuk çatlaklar ise kaynak banyosu katılaştıktan sonra (hatta haftalar sonra) ortaya çıkar.

2.5.5.1. Sıcak çatlak oluşumu

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



Şekil 2.26. Kaynak metalinde oluşan sıcak çatlak hatası (Hulka et al 1993).

Bu durumda, katılma sırasında kaynak metali yeterli sünekliğe sahip olmadığı için kendini çekme sırasındaki Şekil değişimi plastik alanda gerçekleŐerek çatlak oluşumuna yol açabilir. Burada, sünekliği yüksek bir dolgu metali kullanımı ile çatlak oluşum tehlikesi azaltılabilir. Kaynak metalinin hızlı soğuması da bir diğer çatlak oluşum nedenidir. Eğer, esas metal soğuk ve kaynak banyosu küçükse soğuma da o oranda hızlı olacaktır. Buna bağlı olarak, kaynak metalinin katılma sırasındaki büzülmesi (kendini çekme) ok hızlı gerçekleşecek ve bu da çatlak oluşumuna yol açacaktır. Bu durumda, malzemeye n tav yapılması ya da ısı girdisinin artırılması ile soğuma hızı yavaŐlatılarak çatlak oluşumu engellenebilir.

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

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

2.5.5.2. Soğuk çatlak oluşumu

Kaynak dikişi tamamen katılaştıktan sonra ortaya çıkan soğuk çatlak oluşumu için üç koşulun bir araya gelmesi gerekir; bunlar, yeterli derecede hidrojen varlığı, yeterli derecede gerilim ve çatlığa duyarlı malzemedir (sertleşme özelliği). Söz konusu bu etkenlerden birinin ya da birkaçının giderilmesi IEB bölgesindeki soğuk çatlak oluşumunu ortadan kaldırır. Genellikle dikişin ortasında boylamasına olarak ortaya çıkan soğuk çatlak 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda oluşur. Yüksek karbonlu ve alaşımlı çelikler ile yüksek mukavemetli az alaşımlı çeliklerde (HSLA) daha sık rastlanır.

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

2.5.5.3. Gevrek kırılma

Kırılmaları bir kez aşırı zorlanma ile oluşan “zorunlu kırılma” ve zorlanmanın tekrarlanması ile oluşan “yorulma kırılması” olmak üzere iki ana gruba ayırma

olanağı vardır. Zorunlu kırılmalar ise şekil değişiminin olmadığı ya da çok az olduğu “gevrek kırılma” ve şekil değişimi sonucunda oluşan “sünek kırılma” olmak üzere ikiye ayrılır. Sünek malzemeler uygulanan gerilmenin etkisiyle akma sınırının üzerinde plastik şekil değişimine uğrar. Malzemeye uygulanan dış kuvvetlerin etkisi ile elastik şekil değişiminden hemen sonra plastik şekil değişimine uğramaksızın ya da %1 gibi çok az bir uzamadan sonra parçanın iki veya daha fazla parçaya ayrılmasına “gevrek kırılma” denir. Gevrek kırılma, nereden ve ne zaman başlayacağı önceden kestirilemediği için son derece tehlikelidir. Geçmişte önemli kazalara ve büyük kayıplara yol açtığı için, üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış olup bu çalışmalar halen de yapılmaktadır. Kaynaklı yapılarda gevrek kırılmanın önemi oldukça fazladır. Mühendislik yapılarında gevrek kırılmadan çekinilmesinin nedenleri şunlardır;

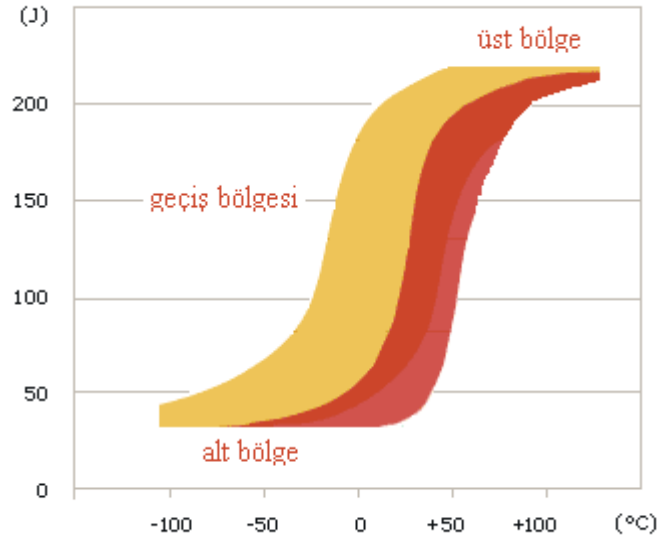
1. Genellikle 10-50 N/mm² gibi çok düşük dış gerilmeler bile hasara yol açabilir,
2. Çatlak parça içinde 5000 m/s gibi çok büyük bir hızla ilerler ve bu sırada hasarı sınırlayıcı önlem almak olası değildir,
3. Malzeme kalınlığının artışı bile kırılmayı engelleyemez.

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

1. Malzemenin gevrek kırılma eğilimi taşıması (heterojen içyapı)
2. Malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin az olması.
3. Çentik veya benzeri kusurların bulunması.
4. Malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinin gevrekleştirici bazı etkenlerden dolayı tükenmiş olmasıdır, zira düşük sıcaklık ve çok eksenli gerilme durumu gevrek kırılmayı kolaylaştıran faktörlerdir.

Kırılma davranışının incelenmesi için geliştirilen deney yöntemleri arasında özellikle çentik darbe deneyi “vurma” yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntemin sakıncası elde edilen vurma değerinin (kıırma işi) sadece malzemeye özgü bir büyüklük olmayıp deney parçasının geometrisine çok fazla bağımlı olmasıdır (Güleç ve Aran 1993). Bu nedenle, çentik darbe deneyinde elde edilen sonuçlar mukavemet hesaplarında kullanılmaz. Deney DIN 51222 ‘ye uygun olarak imal edilmiş sarkaçlı vurma cihazında yapılır. Cihazın çekici önceden belirlenmiş olan bir H yüksekliğinden düşer ve en alt noktada arka yüzüne vurduğu çentikli deney parçasını kırmaya zorlar. Deney parçasının kırılması ya da destekler arasından şekil değiştirerek geçmesi için sarkaç enerjisinin bir kısmı kıırma işi olarak harcanır ve bu değer cihaz göstergesinden doğrudan okunur. Çentik darbe deney parçaları DIN 50115 ‘de standartlaştırılmış olup, bunlardan en yaygın olanları DVM ve sivri çentikli ISO-V parçalarıdır. Numune parça genişliği artıkça vurma tokluk değeri azalır, geçiş sıcaklığı artar.

Vurma değerinin büyük olduğu üst bölgede sümek, alt bölgede gevrek geçiş bölgesinde ise çoğunlukla karışık kırılma görülür. Sümek kırılmayı sağlayan en yüksek enerjiye tavan enerjisi denir. Tavan enerjisi yüksek ve geçiş sıcaklığı düşük olunca tokluk özelliği iyileşir; tavan enerjisi düşük ve geçiş sıcaklığı yüksek olunca da tokluk düşer ve çelik gevrekleşir. Sıcaklık kırılma davranışını etkileyen önemli bir etkidir. Bütün çelikler oda sıcaklığında iyi bir çentik darbe mukavemetine sahip olmalarına karşın bazıları düşük sıcaklıklarda çok gevrek bir davranış gösterirler. Sümek halden gevrek hale geçiş belirli bir sıcaklık aralığında olur ve çelik bu sıcaklık aralığında gevrek hale gelir. Geçiş sıcaklığı, sümek kırılma ile (üst bölge), gevrek kırılma (alt bölge) ayrımını sağlar (Şekil 2.27).



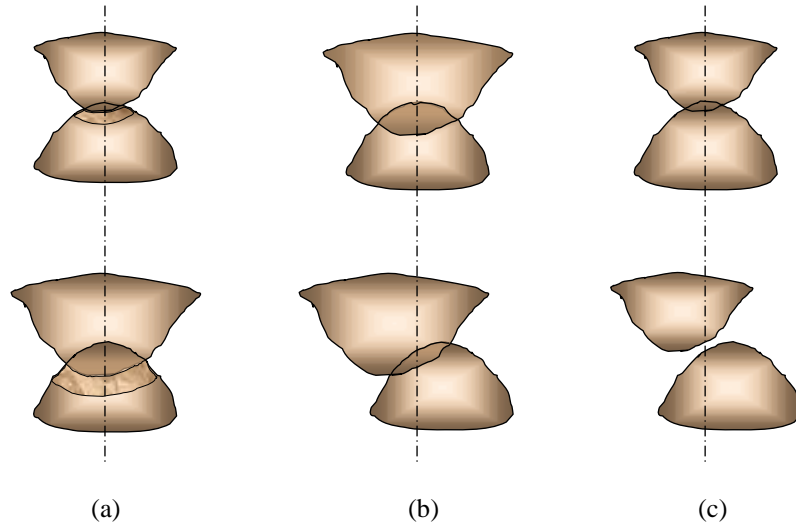
Şekil 2.27. Çentik vurma işinin sıcaklıkla değişimi.

Bir çeliğin geçiş sıcaklığı malzemenin kimyasal bileşimi, uygulanan mekanik ve ısıl işlemler, tane büyüklüğü ve içyapı gibi birçok faktörün etkisi altında olup değişik şekillerde tanımlanabilir;

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

2.5.6. Geometrik kaynak hataları

Dikiş kaçıklığı, bindirme, işlerlik, genişlik/derinlik oranı, kep yüksekliği ve açısı gibi kaynak geometrisindeki düzensizlikler yük altında bağlantının tokluk davranışını olumsuz yönde etkilemektedir. İşlerlik iç ve dış dikişin birbirine geçme miktarı olarak tanımlanabilir. İşlerlik oranı iki açıdan önem taşımaktadır. Dış kaynak sonrası iç kaynağın belirli bir bölümü ısı yayılımı nedeni ile yapı değişikliğine uğrar. Bu bölge kaynak bölgesi olması nedeni ile zaten mikro yapısal değişime uğramış olup, dış kaynak sonrası etkisinde kaldığı ısıl çevrim nedeni ile oldukça kaba taneli bir yapıya dönüşerek tokluk açısından kaynak dikişinin en zayıf bölgesini oluşturur.



Şekil 2.28. İşlerlik ile dikiş kaçıklığı arasındaki ilişki.

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

Kaynak kepi ergiyen telin dikişte oluşturduğu çıkıntı kısmıdır. API 5L standardında, izin verilebilir kaynak kep yüksekliğini, 12,7 mm 'den daha ince malzemelerde maksimum 3,17 mm ve 12,7 mm 'den kalın malzemelerde ise maksimum 4,76 mm olarak verilmiştir. Ancak, şapka açısının da göz önüne alınması durumunda, kep yüksekliğinin maksimum 2 mm ile sınırlandırılmasında yarar vardır. Şapka açısı da 30° ile 50° arasında olmalıdır (Weisweiler and Sergeev 1986).

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

The Welding Institute, genişlik/derinlik oranının 1,8 'den küçük olması halinde, çatlak oluşum tehlikesinin artacağını belirtmektedir (Linnert 1994). Buna karşın, Lincoln Electric, söz konusu bu oranın 0,5 'den küçük olması durumunda çatlak tehlikesinin çok yüksek olacağını, 1,3 'den büyük olması halinde ise çatlak tehlikesinin azalacağını bildirmektedir (Lincoln Electric 2000). Diğer bir yazar ise, iç dikiş için genişlik/derinlik oranının 0,5 ile 10 arasında, dış dikiş için ise bu oranın 1 ile 8 arasında değişebileceğini belirtmektedir (Anık, 1982).

2.6. Gaz Boru Hatlarında Kullanılan Çelikler

Çağımız endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan metalsel malzeme demir esaslı alaşımlardır ki bunların içinde çelikler çok önemli bir yere sahiptir. Çelikleri bu denli önemli kılan özellikleri ise, çok çeşitli alaşım yapabilme olanağının yanı sıra ısıl işlemler yardımı ile de farklı özellikler kazanabilmeleridir. Alaşımlarda belirli özellikleri elde etmek (kuvvetlendirmek) ya da gidermek (zayıflatmak) amacıyla önceden saptanmış miktarlarda bulunması zorunlu olan bileşenlere “alaşım elementi” geri kalan ve istenmeyenlere ise “katışkı” adı verilir. Söz konusu katışkılar kükürt, oksit ve silikat türünden metalik olmayan katışkılar olup çeliğin kalitesini olumsuz yönde etkilemektedirler. Katışkılarının belirli bir miktarı aşmaları ya da heterojen bir şekilde dağılmaları aynı kimyasal bileşime sahip çeliklerin özelliklerinin çok farklı olmasına yol açabilir.

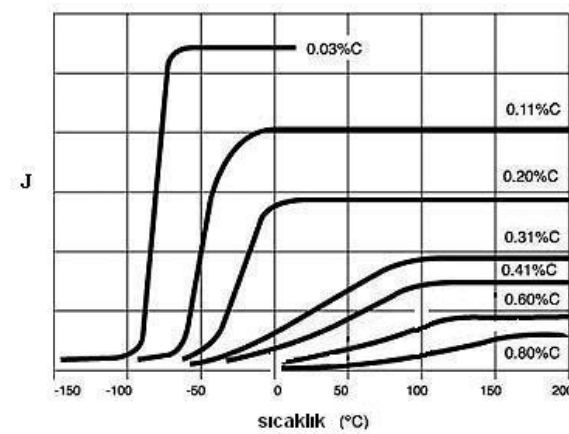
Tablo 2.9. Çeliklerin alaşımlı sayılabilmesi için içerebilecekleri element miktarlarına ilişkin alt sınırlar (EURO-NORM 20-74).

Element	Alt sınır (%)	Element	Alt sınır (%)
Aluminyum	0,10	Nikel	0,30
Bor	0,0008	Niobyum	0,05
Krom	0,30	Kurşun	0,40
Kobalt	0,10	Silisyum	0,50
Bakır	0,40	Titanyum	0,05
Mangan	1,60	Vanadyum	0,10
Molibden	0,08	Zirkonyum	0,05

Alaşım elementi ise çeliğe belirli özellikleri kazandırmak için özel olarak katılan yani “istenen” elementlerdir. Tablo 2.9 ile verilen sınırlara ulaşan ya da bu değerleri aşan elementler çeliğin alaşım elementi olarak nitelendirilirler. Çok sayıda alaşım elementinin birlikte bulunması durumunda, bunların etkilerinin toplanabilir olmaması nedeni ile beklenen özellik değişimleri ancak genel bir çerçevede ele alınabilir ve bu konuda kesin bir öngörü yapılamaz. Elementlerin çeliğin içyapısında tek elementli faz, katı çözeltiler veya ara bileşik durumunda bulunması malzeme özelliklerini farklı şekilde etkiler. Demir esaslı alaşımlarda tek elementli fazlar sadece kurşun ve bakırdan kaynaklanır. Ancak, bu fazların yaratacağı olumlu etkiler sınırlı olduğundan her iki metalde alaşım elementleri arasında önemli bir yere sahip değildir (Güleç ve Aran 1995). Buna karşın, katı çözeltiler ya da ara bileşik oluşturan metaller yarattıkları özellik değişimleri nedeniyle çeliklerin alaşımlandırılmasında oldukça önemli bir rol oynamaktadırlar. Katı çözeltiler oluşturan alaşım elementleri genel olarak ferrit yapıcı ve ostenit yapıcı olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Ferrit yapıcı alaşım elementleri Cr, Al, Ti, Si, Mo ve V ‘dur. Ostenit yapıcı alaşım elementleri ise Ni, C, Co, Mn ve N ‘dur. Ara bileşikler ise en az iki alaşım elementinin atomları arasında çok büyük çekme kuvvetlerinin bulunması sonucu ortaya çıkarlar ve bileşenlerinden farklı ve karmaşık bir kristal yapıya sahip olup, genellikle çok sert ve gevrekler. Çeliklerde teknik açıdan en önemli ara bileşikler karbür ve nitritler ile hem karbon hem de azot içeren karbonitritlerdir.

Nitrür yapıcı elementler Al, B ve Si 'dur. Diğer kuvvetli nitrür yapıcılar, çelik yapısında aynı zamanda karbür yapıcı olarak da davranırlar. Çelikte nitrür yapmayıp sadece karbür yapan element sayısı çok az olup, bunların başında Mo gelir. Mn, Cu ve Ni gibi elementler ise zayıf nitrür ve karbür yapıcı elementlerdir. Hem karbür hem de nitrür yapan elementler arasında ise Cr, V, Nb, Ti ve Zr sayılabilir. Termodinamik verilere göre, genellikle nitrür oluşumu karbür oluşumundan önce gelir. Ancak, V, Nb ve Ti eklenmesi durumunda, bu elementlerin tüm nitrür ve karbürlerinin ostenit fazında erimesi, çökeltilerinin karbonitrürler halinde olmasını da olanaklı yapmaktadır (Ensari 1977). Tüm bu alaşım elementlerinin gerek çeliğin özelliklerine gerekse kaynak bağlantısının özellikleri üzerine etkilerini kısaca incelemekte yarar vardır, buna göre;

Karbon: Çeliğin özellikleri üzerinde en önemli etkiye sahip elementtir. Çeliğin bileşiminde ki %0,1 oranındaki C farklılığı bile, çeliğin metalurjik davranışı ve mekanik özellikleri üzerinde oldukça önemli değişimler yaratır. Karbon, çeliğin mukavemetini ve sertleşme eğilimini artırır. Bu nedenle, malzemenin akma dayanımını arttırmanın en ekonomik yolu karbon ilavesidir. Çeliğin bileşimindeki C miktarı arttıkça malzeme o denli sert ve gevrek olur, sıcak çatlak ve sertleşme çatlakları tehlikesi artar. Süneklik, tokluk ve kaynak edilebilme gibi önemli mühendislik özellikleri çelikteki karbon içeriğinin artması ile bozulmaktadır (Şekil 2.29). Çeliğin bileşiminde ki C miktarının azalması, aynı zamanda, hidrojen kırılabilirliğine karşı direncini de artırır. Çelik bünyesinde çözünmeyen karbon, demir ile birleşerek demir karbür (Fe_3C) bileşiği oluşturularak yapıya dağılır.



Şekil 2.29. Karbonun tokluk üzerindeki etkisi (Hulka et al 1993).

Mangan: Alaşımız çelikler %1,6 ‘ya kadar mangan içerebilirler. Bunun üzerinde ise “alaşımlandırılmış” sayılırlar. Demire kıyasla, manganın oksijen, kükürt ve karbona karşı ilgisi daha fazladır, bu nedenle; manganın oksit ve kükürt giderme özelliği vardır. Mn ergimiş demire katıldığında oksijen ile reaksiyona girerek mangan oksit (MnO) oluşturur. Ancak, bu reaksiyon Mn veya O₂ bitene kadar devam etmez, bir süre sonra belirli bir denge oluşur. Diğer bir deyişle, oksijenin tamamı giderilemeyip belirli bir noktaya çekilmiş olur. Bu nedenle, mangan Al ya da Si derecesinde bir dezoksidasyon elementi olarak nitelendirilmez. Mn ayrıca kükürt ile birleşerek mangan sülfür (MnS) oluşturur. MnS ‘in demir içindeki çözünürlüğü son derece az olup, kaynak koşulları izin verdiği sürece curufa karışarak kaynak banyosundan uzaklaşır. Bunun dışında, serbest haldeki Mn, karbonla birleşerek sertlik artışına neden olan mangankarbür (Mn₃C) oluşturur (Anık ve Tülbentçi 1966). Tüm karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde ve kaynak ek metalllerinde ve tozlarında alaşım elementi olarak kullanılan manganın genel olarak üç olumlu etkisi vardır, bunlar; oksijen ile birleşerek dezoksidan görevini görmesi, sıcak çatlığa yol açan demirsülfat oluşumunu engelinecek şekilde kükürtü bağlaması ve son olarak çelikte mukavemet artışı sağlamasıdır. Tüm bu etkilerin sonucunda mangan kırılma tokluğunu iyileştirici yönde bir etkiye sahiptir. Ancak, çeliğin bileşimindeki mangan artışı sertlik artışına ve dolayısıyla çatlak oluşum tehlikesinin de artmasına neden olur. Mn miktarının az olması ise gözenek oluşumunu artırır.

Kükürt: Demir içindeki kükürtün çözünürlüğü yok denecek kadar az olduğundan, içyapıda karakteristik demir sülfür (FeS) fazı ortaya çıkar. Demir sülfürün şekil değiştirme kabiliyeti az olduğundan tane sınırı kırılmasına yol açar. Bu nedenle, çeliklerdeki kükürt miktarı fosforda olduğu gibi sınırlandırılır. Ancak, miktarı çok düşük dahi olsa içyapıdaki kükürtün tehlikesiz bir biçime dönüştürülmesi zorunludur. Çeliğin kükürten arındırılması ve metalik olmayan kalıntıların düzenli bir biçimde dağıtılması kükürtün IEB bölgesinde neden olduğu tabaka ayrılmasını engeller ve aynı zamanda çeliğin mukavemetini artırır. Kükürt kaynak metalinde sıcak çatlak tehlikesini artırır. Çoğu karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde kalıntı element olarak kükürt maksimum %0,04 ile sınırlandırılmıştır.

Silisyum: Oksit ve kükürt giderme özelliği olup, çeliklerde alaşım elementlerinin düzenli olarak yayılmasını sağlar. Ancak, Si miktarının artırılması sünekliği azaltarak kaynak bağlantısını daha gevrek yapar. Oksijen ile birleştiğinde cüruf kalıntılarına yol açan SiO₂ 'yi oluşturur. Alaşimsız çeliklerde % 0,5 'e kadar silisyum bulunabilir.

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

Krom: Karbür yapıcı (Cr₃C) olup, mukavemet ve sertlik artışı yaratır. Aynı zamanda, malzemenin korozyon direncini de artırır.

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

Bakır: Sertlik kazandırmak amacı ile çok düşük oranlarda çeliğe katılan bir alaşım elementi olup, %0,40'a kadar çeliğin içinde çözünebilmektedir. Kaynaklı birleştirme işlemleri için bu oranın üzerine çıkılmaması önerilir. Çeliğin bileşimindeki, %0,5 'in üzerindeki bakır miktarı çatlak oluşum tehlikesini artırır.

Fosfor: Kalayla birlikte tokluğu en çok azaltan iki elementten birisidir. Çelikte %0,6 oranında fosfor bulunması durumunda geçiş sıcaklığı 300 °C 'ye kadar yükselmektedir (Güleç ve Aran 1995). Bu nedenle, özellikle kırılma tokluğunun önem taşıdığı uygulamalarda kullanılan çeliklerde, fosfor miktarı olabildiğince düşük tutulur. Kaynak metalindeki fosfor miktarı kaynak tozunun, kaynak telinin ve metalin bileşimindeki toplam fosfor miktarına oldukça yakındır. Bu nedenle, kaynak metalindeki fosfor miktarına sınırlama getiriliyorsa bunu sağlamanın en güvenilir yolu; tel, toz ve metalin bileşimindeki toplam fosfor miktarının kaynak metalinde istenen miktardan daha az olmasını sağlamaktır.

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

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

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

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

Oksijen: Demir yüksek sıcaklıklarda çok az O₂ absorbe etmektedir (1400 °C ‘de yaklaşık %0,1 oranında). Sıvı fazda ise demirin absorbe ettiği oksijen miktarı hızla artmakta, fakat aşağıdaki denklemlerden de görüleceği gibi yapıda bulunan Mn ve Si ile dezokside edilerek curufa yansıtılmaktadır (Denklem 2.28 ve 2.29). Oksijen ile oluşacak reaksiyonların kontrol alınabilmesi için kullanılan yöntemlerden biriside kaynak ek metaline Mn, Si ve bazen de Al ve Ti gibi dezoksidan elementlerin eklenmesidir. Oksijen çeliğe nüfuz ettiğinde;

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



Azot: Oda sıcaklığında azot oldukça düşük miktarlarda absorbe edilirken, sıcaklığın artmasıyla birlikte absorbe edilen azot miktarı da artar. Kaynak tekniği bakımından, ark boyunun artması absorbe edilen N₂ miktarını da artırır. Azot, çelik için çok zararlı katışkılarından birisi olup istenmeyen elementler grubundandır. Onbindebirler oranında bulunması bile akma sınırı ve çekme mukavemetini çok az bir miktarda yükseltirken, şekil değiştirme kabiliyetini ve de özellikle çentik vurma tokluğunu şiddetli bir şekilde düşürür. Bu nedenle azot miktarının %0,01 sınırını aşmaması zorunludur. Çelikte çözülmüş olan azot atomları özellikle dislokasyonların sık olduğu yerlere yayınarak dislokasyon hareketini engeller yani malzemenin şekil değiştirme kabiliyetini azaltır ve malzemeyi gevrekleştirir. Azotun bu olumsuz etkilerini gidermek için, azota karşı eğilimleri demirden daha yüksek olan Al, Ti ve Nb gibi elementlerin sıvı çeliğe katılması azotu zor çözünen nitrürler olarak bağlar. Nitrür oluşturmamış serbest azot (N_f) malzemenin tokluk geçiş sıcaklığını (ΔT_G) olumsuz yönde etkiler (Denklem 2.30). Örneğin, %0,005 oranındaki serbest azot geçiş sıcaklığının yaklaşık 50 °C daha yükselmesine yol

açar. Ancak, azotun bazı alaşım elementleri ile birleşerek sert ve aşınmaya karşı nitrür oluşturma gibi faydalı etkisi de vardır (Tekin 1984).

$$\Delta T_G = 700 \cdot (N_f)^{1/2} \quad (2.30)$$

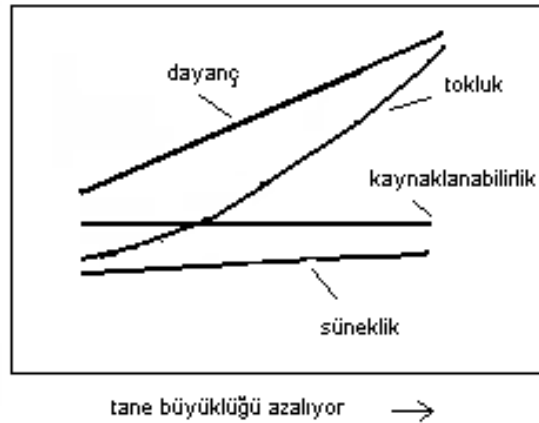
Hidrojen: Hidrojen gazı, diğer gazlara karşın kaynak hatası oluşumunda çok daha fazla rol oynar. Hidrojen de azot gibi mukavemet değerlerini çok fazla yükseltmeden çeliği gevrekleştirir. Kaynak sırasında hidrojen absorpsiyonu katılmış kaynak metalinde gözenek ve IEB 'de çatlak oluşumu gibi kaynak hatalarına yol açabilir. Hidrojen, kaynak banyosuna birçok farklı yerden girebilir. Nem ve organik bileşikler (yağ, gres vb.) hidrojenin başlıca kaynaklarıdır. Bu nedenle, tel ve toz gibi kaynak sarf malzemeleri ile kaynak edilecek yüzeyler yeteri derecede temiz ve kuru olmalıdır. H₂O molekülü doğada mevcut olan en sağlam moleküllerdendir. Su molekülünü oluşturan kovalent bağ ancak 2900 °C sıcaklıkta çözünür. Elektrik akımının 3600 °C 'ye ulaşan sıcaklığı su molekülünü parçalayabilecek enerjiye sahiptir. Dolayısıyla, kaynak yapılan yüzeylerde ya da tozun içinde nem olarak bulunan su kısmen bileşenlerine ayrılarak (parçalanarak) hidrojen ve oksijene dönüşür. Açığa çıkan oksijen, Fe, Mn ve Si gibi elementlerle derhal reaksiyona girerek bağımsızlığını yitirir. Ancak, hidrojen ne demirle ne de onun alaşım elementleri ile herhangi bir reaksiyona girmez ve yabancı madde olarak varlığını sürdürür.

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

2.6.1. Yüksek mukavemetli az alaşımlı çelikler

Çelik yapısında mukavemet artırıcı dört farklı mekanizma vardır, bunlar; yapıdaki perlit miktarı (%C), Mn ve Si katı çözültüsü, ferrit tane boyutu ve karbür, nitrür veya karbonitrür şeklindeki bileşiklerin varlığıdır. Bu mekanizmaların her birinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri farklıdır. Özelliklerin en dengeli durumunu elde edebilmek için mukavemet artırıcı bu mekanizmalardan bazıları seçilirken bazıları kullanılmayabilir. Sertleşme mekanizmaları içinde, mukavemet ile birlikte tokluğu da yükseltebilen tek sertleştirme mekanizması “tane küçültmesi” dir. Küçük ferrit taneleri, düşük karbon seviyelerinde bile kaynaklanabilirliği ve sünekliği etkilememeksizin mukavemet artışı sağlar (Şekil 2.30). İkincil faz partiküllerinden AlN, NbC ve Ti(C,N) birçok çelikte tane küçültücü olarak kullanılır. Bunların tane küçültücü etkisi, tane sınırlarını kilitleyici özelliklerinden ileri gelir. Bu temel nedenden dolayı, modern yapı çeliklerinde, karbon içeriği olabildiğince düşük tutularak, yüksek mukavemet özellikleri tane boyutunun düşürülmesi ile sağlanmıştır.

Modern yapı çelikleri olarak adlandırılan çelikler genellikle yalın karbonlu çeliklere oranla daha yüksek mukavemetli çelikler olup, göreceli yüksek mukavemetlerinden dolayı “Yüksek Mukavemetli Az Alaşımlı” ya da HSLA (High Strength Low Alloy Steels) çelikleri olarak adlandırılırlar.



Şekil 2.30. Tane küçülmesinin çelik özellikleri üzerindeki etkisi (Denizkuşu 2001).

HSLA çeliklerinde alaşım elementlerinin toplamı genellikle %2 değerini aşmaz. Çoğunda ise Mn katımlarının dışında bu değer %0,1 ile 0,2 arasındadır. Bu çeliklerin bileşimlerdeki alaşım elementlerinin bu derecede düşük olmasına karşın, çeliğe belirli özellikleri geliştirmek amacıyla katıldıkları için bunlara “mikro alaşım elementi” denilir. HSLA çeliklerinin olağan yapı çeliklerinden temel farkı onların tane büyüklüklerinin göreceli olarak çok daha düşük olmasıdır. HSLA çelik uygulamasının temel amacı, ince kesitlerde yüksek mukavemet eldesi ile ağırlıktan kazanç sağlamak yani maliyetleri düşürmektir (Denizkuşu 2001).

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

Mikro alaşımlı çeliklerin üretimi döküm, ostenitleştirme, haddeleme ve soğutma olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilir. Mikro alaşım elementlerinin ilavesi potaya döküm esnasında yapılır. Ostenitleştirme, en önemli üretim aşamalarından birisidir. Mikro alaşım elementleri C ve N ile ilgileri yönünde reaksiyona girerek karbür, nitür ve karbonitrürleri oluştururlar. Ancak, mikro alaşım elementleri çözünme sıcaklığı bakımından büyük farklılıklar gösterir. Vanadyumun oluşturduğu V(CN), 1150 °C ‘de ostenit içinde çözünür. Niobiyumun oluşturduğu Nb(CN) ise 1250 °C ‘nin üzerindeki sıcaklıklarda çözünürler. Bu nedenle, ostenitleştirme işlemi 1100 ile 1300 °C gibi geniş bir sıcaklık aralığında yapılır.

Çelikte bileşimindeki C ve N miktarı düştükçe ve ostenitleştirme sıcaklığı artıkça mikro alaşım elementlerinin çelik içindeki çözünürlükleri artar. Ostenitleştirme sıcaklığı son derece önemlidir. Sıcaklık mikro alaşım elementlerinin çözünmesine olanak verecek kadar yüksek, ancak aynı zamanda tane irileşmesine neden olmayacak kadar da düşük olmalıdır (Ersoy 2000). Endüstride yaygın olarak kullanılan üç tür ince taneli yapı çeliği vardır. Bu çeliklerin elde edilmesinde uygulanan yöntemler ile mukavemet artırıcı mekanizmalar birbirinden farklıdır;

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

2.6.1.1. Islah edilmemiş ince taneli yapı çelikleri

Çok az miktarlarda katılan V, Nb, Ti ve Al gibi mikro alaşım elementlerinin yalnız başlarına ya da bileşenleri durumunda mikro yapı içinde oluşturdukları ve ancak 1100 °C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda çözültüye geçen çeşitli karbür, nitrür ve karbonitrürler ostenit bölgesinde dahi tane büyümesini engelleyerek yüksek mukavemetli ve tok bir çelik grubunun elde edilmesine olanak sağlarlar. Bu alaşım elementlerinden V ve özellikle Nb eklenmesi (%0,02-0,03) akma sınırını oldukça yükseltir (80-100 N/mm²). Ni katkısı ise, çentik darbe mukavemetinin yükselmesini sağlar.

2.6.1.2. Islah edilmiş ince taneli yapı çelikleri

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

2.6.1.3. Termomekanik yöntem ile elde edilmiş ince taneli yapı çelikleri

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

2.6.2. Gaz iletim hatlarında kullanılan çeliklerin özellikleri

Özellikle, korozif nitelikteki doğal gaz ve ham petrol iletiminde kullanılan “off-shore” boru hatlarına yönelik kalite istemleri her geçen gün daha da artmaktadır. Bu tür boru hatlarının tasarım aşamalarında, söz konusu bu zorlu çalışma koşullarından dolayı borunun mukavemeti ve/veya kalınlığındaki artışlar kaçınılmaz duruma gelmektedir. Aynı zamanda, hattın güvenliği açısından gerek boru gövdesinde gerekse kaynak dikişinde özellikle düşük sıcaklıklarda oldukça yüksek tokluk özellikleri istenmektedir. Öte yandan, servis sırasında boru hattının kısa süreli de olsa sour gaz ya da ham petrol nakli için kullanımı söz konusu ise, HIC (Hydrogen Induced Cracking) testleri gerek çelik üreticileri gerekse boru üreticileri için önemli bir kabul koşulu durumuna gelmektedir.

Gaz iletim boru hatlarında “sweet gas” ve “sour gas” olmak üzere iki tür çelik kullanımı söz konusudur. Sweet gazlar için, genellikle 0,09 C ve 1,6 ‘ya kadar Mn içeren ve karbon eşdeğeri I_{IIW} ‘ye göre 0,32 ‘ye kadar çıkabilen çelikler kullanılmaktadır. Bunlar çoğunlukla, Nb ve gerekiyorsa Ti ya da V eklenmesiyle alaşımlandırılmış olup, -20 °C ‘de ki tokluk değerleri 200 J civarında olan çeliklerdir. Tipik bir X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 2.10 ‘da verilmiştir.

Tablo 2.10. Sweet-gaz boru hattında kullanılan X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi.

C	Si	Mn	P	S	Al	N	V	Nb	Ti
0,093	0,395	1,56	0,011	0,002	0,053	0,0074	0,075	0,051	0,0040

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

NACE çözeltisi (pH~3) ile yapılan HIC testlerinden olumlu sonuç alabilmek için sülfür içeriğinin %0,0015 'den daha az olması gerekir. Bu nedenle, çelik üretimi sırasında desülfürizasyon sonrası oluşan kalıntı sülfürü de giderebilmek için sülfüre karşı ilgisi yüksek olan kalsiyum ile işleme tabi tutularak çeliğin içindeki sülfür istenilen düzeye getirilir. Alaşım eklemeleri, özellikle Cu ve Ni malzemenin HIC 'e karşı mukavemetini artırır (Graf and Niederhoff 2000). pH>5 olan BP çözeltisi ile yapılan testlerde, bu elementler koruyucu bir film oluşturarak hidrojenin çelik içerisine yayılımını engellerler. Ancak, pH<5 ise, bu koruyucu film oluşmaz.

Özet olarak, HIC 'e karşı dirençli boru hattı çeliklerinde ki karakteristik özellikler; düşük miktarda C, Mn ve S içeriği, Ca ya da benzer etkiyi verecek elementler ile sülfür kalıntılarının küreselleştirilmesi, düşük oranda oksit kalıntıları ile düşük oranlarda Cu ve Cr eklenmesi yapılmasıdır. Off-shore gaz hattında kullanılmak üzere üretilmiş bir X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 2.11 ve 2.12 'de verilmiştir.

Tablo 2.11. Off-shore boru hattında kullanılan X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi.

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

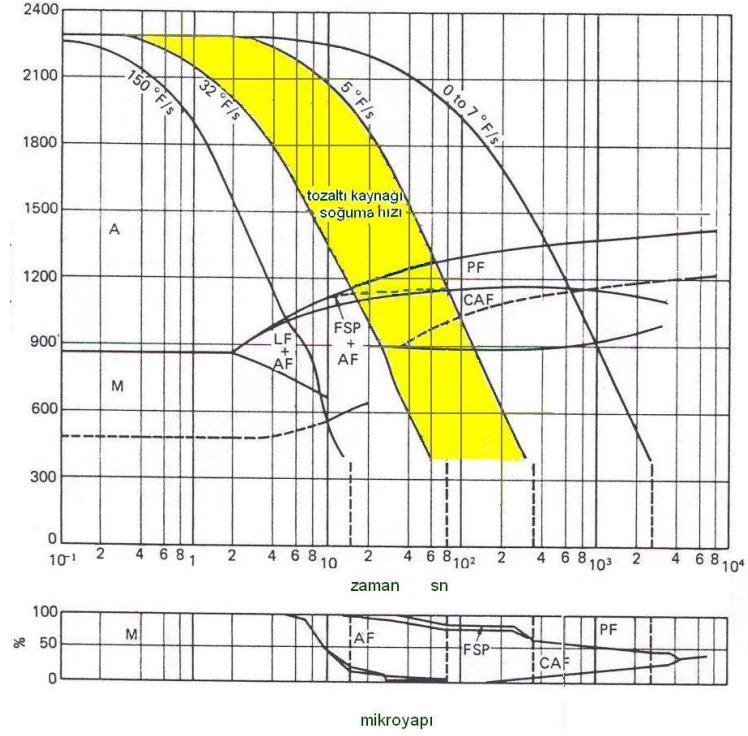
Tablo 2.12. Off-shore boru hattında kullanılan X-65 çeliğinin mekanik özellikleri.

Rt _{0,5} MPa	Rm MPa	%A	- 20 °C (J)		
			Kaynak	IEB	Ana metal
485	572	50,4	84	310	336

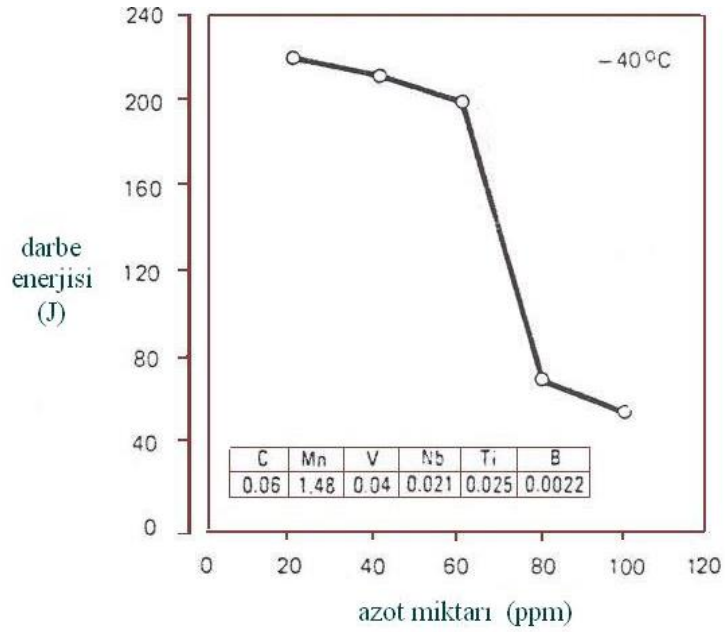
2.6.3. Çeliğin kimyasal bileşiminin kaynak dikişinin tokluk özellikleri üzerindeki etkisi

Tozaltı kaynağında, kaynak metali genel olarak büyük bir oranda ana metalden oluşmaktadır. Bu nedenle, ana metalin kimyasal bileşiminin kaynak bağlantısının kimyasal bileşimi, mikro yapısı, tokluk özellikleri ve çatlak hassasiyeti üzerindeki etkisi çok fazladır. IEB bölgesinin tokluk özelliklerini artırma yönündeki olanakların kısıtlı olmasına karşın, kaynak metalinde uygun tel ve toz kullanımı ile istenilen kimyasal bileşimi sağlama ve dolayısıyla kaynak metalinin tokluk özelliklerini iyileştirme olanağı oldukça fazladır. Şekil 2.31’de, kimyasal bileşimi %0,1 C, %1,37 Mn, %0,31 Si, %0,002 P, %0,020 S, %0,06 Cr, %0,02 Mo, %0,08 Ni, %0,15 Cu, %0,03 Nb, %0,034 O ve %0,010 N olan bir HSLA çeliğine ait kaynak metalinin soğuma eğrisi görülmektedir. 800 ile 500 °C arasındaki soğuma süresindeki herhangi bir değişim (yani ısı girdisindeki değişim) kaynak metalinin mikro yapısında büyük farklılıklar yaratmaktadır. Bilindiği gibi, gerek kaynak metalinin gerekse ısıdan etkilenmiş bölgenin tokluk özellikleri, ısı girdisinin artması ile bozulmaktadır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, kaynak metalinin mikro yapısındaki iğnemsî ferrit (acicular ferrite-AF) miktarı arttıkça kaynak metalinin tokluk özellikleri de iyileşmektedir. Mn, Mo ve Ni, iğnemsî ferrit oluşumunu artırarak kaynak metalinin tokluk özelliklerine olumlu katkı sağlamaktadır (Hulka 2001). Ancak, burada önem taşıyan bir konuda kaynak metalindeki serbest azot miktarıdır. Azot miktarındaki artışa bağlı olarak kaynak

metalinin tokluk özellikleri düşmektedir; bu nedenle, azotu bağlamak için Ti içerikli tel kullanımı oldukça yüksek tokluk değerlerinin elde edilmesine olanak sağlar (Şekil 2.32).



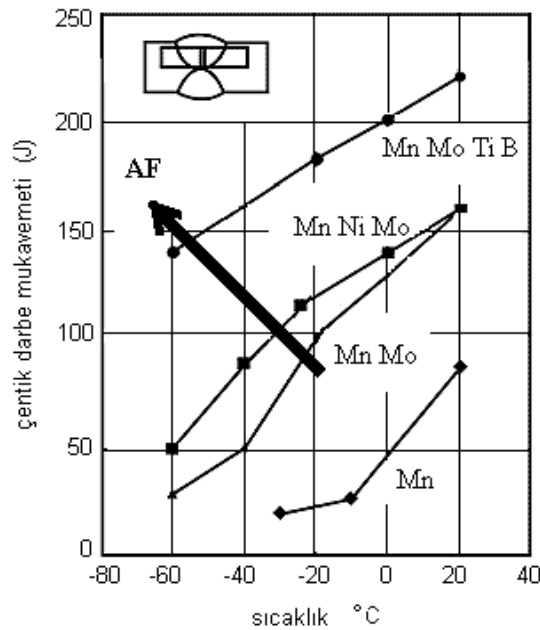
Şekil 2.31. HSLA çeliği kaynak metalinin soğuma eğrisi (ASM Handbook 1983)



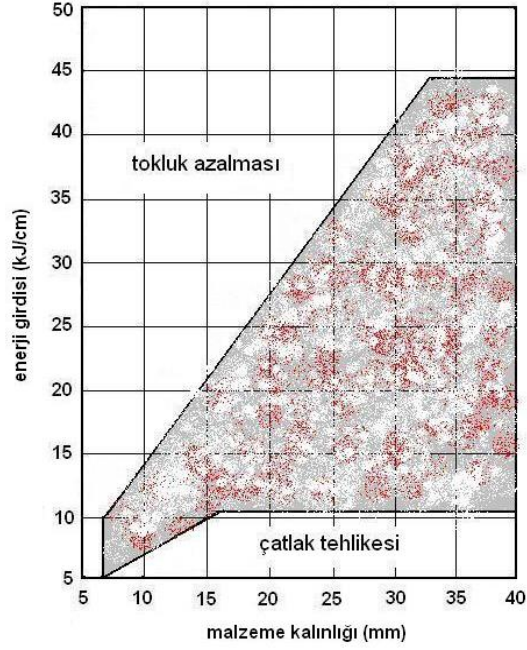
Şekil 2.32. Kaynak metalindeki azotun tokluk üzerindeki etkisi (Graf 2000).

Sonuç olarak, kaynak metalinde uygun tokluk özelliklerinin elde edilebilmesi için, kaynak metalinde C, Mn ve Mo arasında uygun bir dengenin kurulması ve Ti-B içerikli kaynak teli ile alaşımlandırılması oldukça önemlidir (Şekil 2.33) (Jansen et al 2002). Ancak, Ti ve B ile alaşımlandırılmış kaynak telleri mutlaka düşük oksijen içerikli bazik esaslı tozlar ile eşlendirilmelidir.

IEB bölgesinde istenen yüksek tokluk özelliklerine ulaşmada malzemenin kimyasal bileşiminin yanı sıra kaynak parametreleri de oldukça büyük bir öneme sahiptir. Bilindiği gibi, soğuma hızının yükselmesi durumunda (hızlı soğuma) oluşan martenzitik yapı IEB bölgesinin tokluk özelliklerinin düşmesine yol açar. Tozaltı kaynağının en önemli karakteristik özelliklerinden birisi de yüksek ısı girdisi ve buna bağlı olarak yavaş soğuma hızıdır ($t_{8/5} \sim 50\text{sn}$) (Bavaria Schweistechnik 2003). Yavaş soğuma durumunda ise iri taneli bölgenin genişlemesi nedeni ile yine tokluk azalması oluşur. Tane irileşmesi ise HSLA çeliklerinde özellikle düşük sıcaklıklarda IEB bölgesinin tokluk özelliklerini sınırlayan ana etkidir. İnce taneli yapı çeliklerinin kaynağında, ön tav sıcaklığı, enerji girdisi ve parça kalınlığı kaynak bölgesinin soğuma hızını etkileyen en önemli üç faktördür. Kaynak bölgesinin özelliklerini kontrol altında tutabilmek için bu üç etkenin bir arada değerlendirilmesi gereklidir.



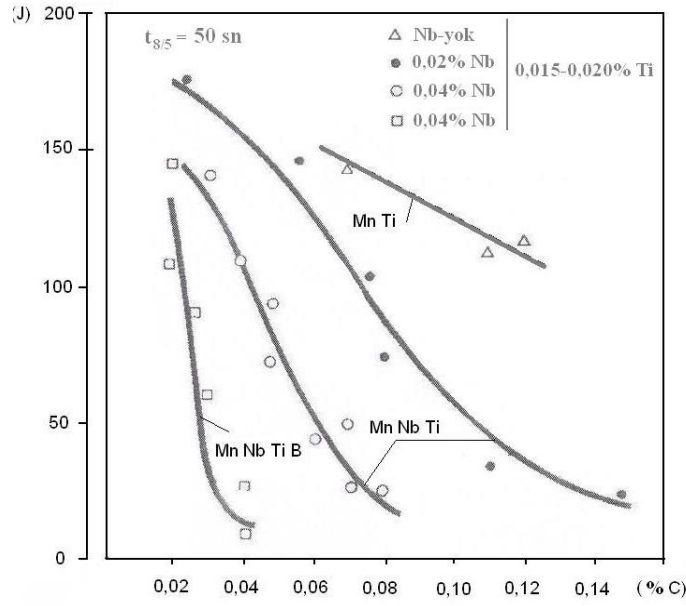
Şekil 2.33. Kaynak metalinde iğnemsiz ferrit (AF) oluşumu (Hulka 2001).



Şekil 2.34. StE 460 çeliğinin kaynağında kalınlık ile enerji girdisi arasındaki ilişki (Tülbentçi ve Kaluç 2001).

Uygulamada, ısı girdisi için ortalama bir değer olarak kaynak edilecek malzeme kalınlığının her bir mm 'si için 1 kJ/cm seçilir (Tülbentçi ve Kaluç 2001). Şekil 2.34 'de StE 460 çeliğinin kaynağında kalınlık ile ısı girdisi arasındaki ilişki görülmektedir. Bu diyagramdan da görülmektedir ki; ısı girdisinin artması ile kaynak dikişinin tokluk özellikleri bozulmakta, ısı girdisinin azalması durumunda ise hızlı soğumadan dolayı martenzit oluşumu ve çatlak oluşum tehlikesi artmaktadır. Doğal gaz boru hatlarında oldukça yaygın olarak kullanılan StE 460 ince taneli yapı çeliği için DIN 17102-1983 'de soğuma süresinin en az 6 sn en çok 25 sn olması gerektiğini bildirmektedir (Gülbahar ve Akay 1989).

Şekil 2.35 'de Ti ile alaşımlandırılmış çeliklerde C, Nb ve B 'un IEB bölgesindeki tokluk özelliklerine etkisi görülmektedir (Peters et al 1998). Genel olarak, çeliğin bileşimindeki C miktarının azalmasıyla birlikte tokluk özelliklerinde belirgin bir artış sağlanmaktadır. Ni içermeyen ve maksimum %0,025 Ti ile sınırlandırılmış olan Mn-Ti çeliği %0,12 gibi oldukça yüksek bir C içeriğinde bile oldukça iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Ancak, bu çeliğe %0,04 oranında Nb eklendiğinde arzu edilen yüksek tokluk değerleri C miktarının %0,04 'e düşmesi halinde elde edilmektedir. Mn-Nb-Ti-B çeliğinde ise C miktarı %0,02 'ye kadar düşmelidir.

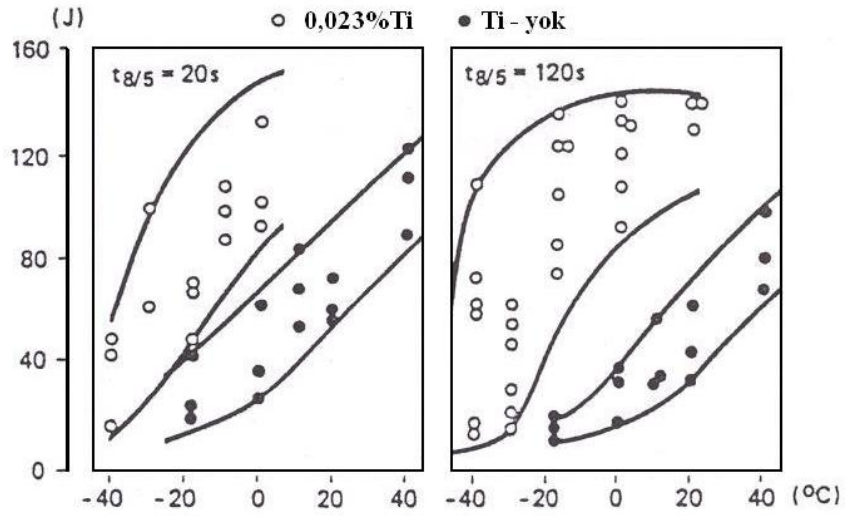


Şekil 2.35. C, Nb ve B ‘un IEB bölgesi tokluk özelliklerine etkisi (Peters 1998).

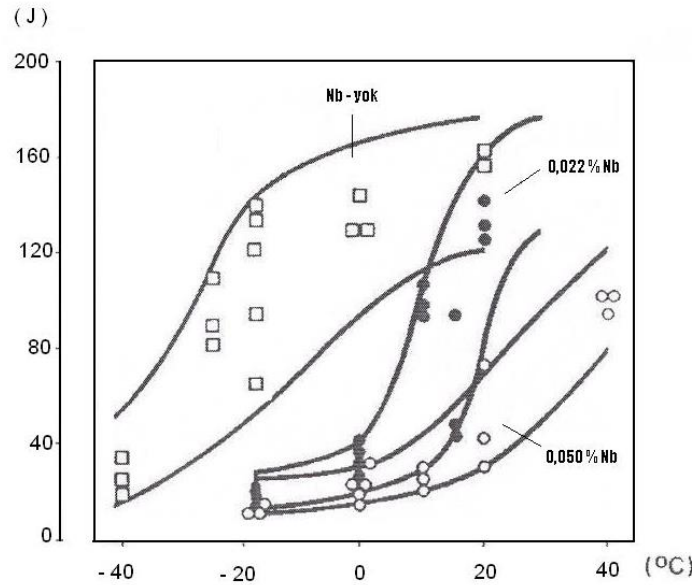
Bu nedenle, düşük tokluk özelliğinden dolayı B içerikli çeliklerin, gaz iletim boru malzemesi olarak kullanımı önerilmemektedir. Yüksek ısı girdisinin söz konusu olduğu kaynak yöntemlerinde, ergime sınırına bitişik IEB bölgesinin mikro yapı ve tokluk özellikleri üzerinde titanyumun, belirli alaşımlama koşulları altında olumlu etkisinin olduğu bilinen bir gerçektir. Boru hatlarında kullanılan çelik borular için malzemeye belirli bir oranda Ti eklenmesi, IEB bölgesinin tokluk özelliklerini iyileştirir. Çok ince zerrecikler halinde dağılmış bulunan titanyum-nitrür ve titanyum-oksit tanecikleri tane büyümesini engelleyici yönde davranırlar. Titanyum ‘un soğuma sırasında IEB bölgesinde ki tane inceltici etkisini Şekil 2.36 ‘dan da görme olanağı vardır (Peters et al 1998).

%0,023 oranında Ti içeren çeliğin IEB bölgesindeki tokluk özellikleri, Ti içermeyen çeliğe karşın çok daha iyidir; bu da, titanyumun tane inceltme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Titanyumun tane inceltme özelliği ise, çeliğin bünyesindeki azot miktarına (60-80 ppm) bağlıdır. Ancak, Nb içermeyen ve termomekanik haddeleme yolu ile üretilmiş çeliklerde, Nb eksikliğini gidermek ve arzu edilen mukavemet özelliklerini kazandırmak amacıyla yüksek oranda (>%0,025) Ti ile mikroalaşımlama yapılmış çeliklerin boru üretiminde kullanılmaları önerilmez. Çünkü bu tür çelikler yapı itibariyle, Nb-esaslı çelikler

gibi ince taneli çelik özelliklerini taşımaz ve tokluk özellikleri düşük olur. Ti miktarının artması ile birlikte IEB bölgesinin tokluk özellikleri düşmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken konu, söz konusu çeliğin Nb içermemesidir. Gaz boru hatları için zorunlu olan mukavemet özelliklerinin sağlanması için çeliğe Nb eklenmesi söz konusu olunca, tokluk özelliklerinde belirgin bir düşme olur (Şekil 2.37). % 0,0015 oranındaki çok küçük Nb ilavesinde dahi, Nb ergime sınırına yakın yüksek sıcaklıklara maruz kalmış bölgelerde çözünerek TiN 'nin tane inceltici etkisini ortadan kaldırır.



Şekil 2.36. Titanyumun IEB bölgesinin tokluk özelliklerine etkisi (Peters 1998).



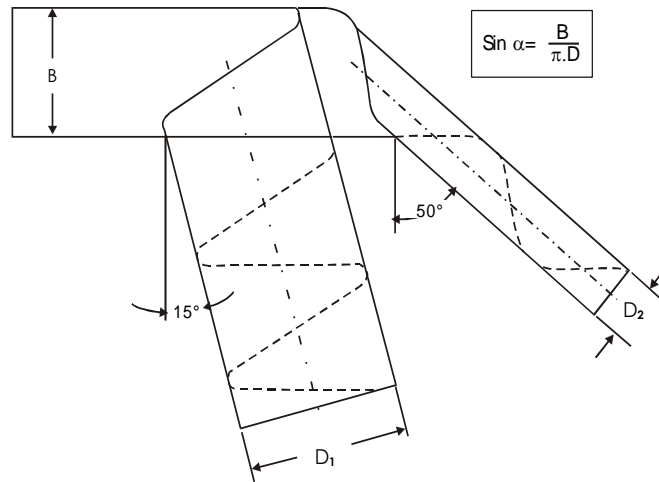
Şekil 2.37. IEB bölgesinin tokluk özellikleri üzerine Nb 'un etkisi (Peters 1998).

2.7. Tozaltı Kaynağı İle Gaz İletim Hat Borusu Üretimi

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

2.7.1. Spiral dikişli boru üretim yöntemi

Spiral kaynaklı boru üreten makineler ana prensip, tahrik silindirleri tarafından itilen sac malzemeye, şekillendirme makaraları yardımı ile spiral bir hareket yaptırılmasıdır. Malzemenin sac olarak makina üzerinde ilerlediği bölümün, malzemenin kaynak sonrası boru olarak ilerlediği bölüm ile yaptığı açı boru çapını belirleyen en önemli etkidir. Bu açı makinaaya yerleştirilen bant genişliği ve elde edilmek istenen boru çapı göz önüne alınarak belirlenir (Şekil 2.38). İlgili açı formülünden de görüldüğü gibi, bant genişliğinin sabit tutulması durumunda, makina ayar açısının değiştirilmesi ile elde edilen boru çapı da değişmektedir. Yine benzer şekilde, makina ayar açısı ile oynayarak, aynı çaplı boruyu farklı bant genişliklerinden elde etmek mümkündür (Peters et al 1982). Sac rulonun makinaya yüklenmesinden sonra, üretimde sürekliliğinin sağlanması için biten rulo ile yeni rulo uçları birbirine kaynak edilir (uç kaynak). Uç kaynak işlemi tozaltı kaynak yöntemi ile tek ya da tandem kaynak yöntemi ile yapılır.



Şekil 2.38. Spiral dikişli kaynak makinası açı ayarı.

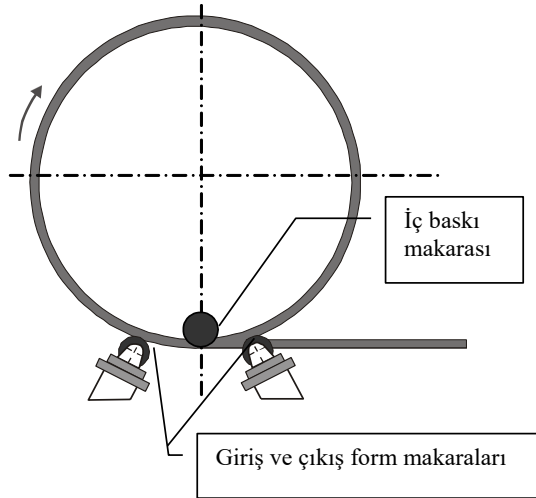
Bantların özellikle son kısmındaki 1/3 'lük kısmı diğer bölgelere kıyasla daha küçük bir sarım radyüsüne sahiptir. Hatasız bir kaynak elde etmek için, bandın kaynak noktasına gelmeden önce sarımdan kaynaklanan eğriliklerinin giderilmesi gereklidir. Bu nedenle, bant çoğunlukla uç kaynağın hemen sonrasında tahriksiz bir role düzeneğinden geçirilerek doğrultma işlemine tabii tutulur.

Boru çapını sabit tutabilmek ve iyi bir kaynak dikiş kalitesini elde edebilmek için önem taşıyan konulardan bir tanesi de bant genişliğinin sabit tutulmasıdır. Bant genişliğinin öngörülenden daha dar olması halinde kaynak noktasında açma, aksi durumunda ise bindirme oluşur. Ayrıca, bant kenar yüzeyinin kalitesi iyi bir kaynak dikişi elde etmek için çoğu zaman yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, kenar kesme sonrası freze ile malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak ağzı açma işlemine geçilir. Bazı durumlarda, kaynak ağzı açılmadan önce bant kenarlarının belirli bir bölümü kesilerek çıkartılır (Palmen and Schiffers 1997). Söz konusu bu kesme işlemi mekanik ya da ısıl kesme yöntemi ile olabilir. Bant et kalınlığının değiştiği bölgelerde, kılavuz roleler yardımı ile kesme ekseninin hassas bir şekilde ayarlanması gerekir; aksi halde kaynak ağzında oluşabilecek bozukluklar, o bölgelerdeki kaynak kalitesinin de bozulmasına yol açar. Açılacak olan kaynak ağzı, malzeme kalınlığına bağlı olarak I, Y veya X biçiminde olabilir.

Bandın ilerletilmesi tek ya da çift roleli tahrik grubu ile sağlanır. Role ile bandın temas yüzeyinde oluşan kuvvetin daha homojen yayılması nedeni ile çift roleli tahrik grubu daha avantajlıdır. Ancak, burada dikkat edilmesi gereken konu, role grupları arasındaki paralelliğin ve çalışma sırasındaki eşleşme ve uyumlarının çok hassas olması gerekliliğidir. Tahrik grubu ile biçim (form) verme grubu arasındaki uzaklığın çok fazla olması durumunda, özellikle ince etli bantlarda düşey yönde sehim oluşabilir ve bant ilerlemesi kontrol altına alınamaz. Bu nedenle, tahrik roleleri olabildiğince biçim verme grubuna yakın olarak yerleştirilir. Bant sürekli olarak tahrik rolelerini merkezleyecek şekilde makinaya yerleştirilir ve tüm makina ayarları bunu sağlayacak şekilde yapılır. Biçim verme öncesi yapılan son işlem bant kenarlarının kıvrılmasıdır. Çatılanma ve bindirme tipi hataların önlenmesi açısından, kenar kıvrırma son derece önemli bir işlemdir. Burada iki

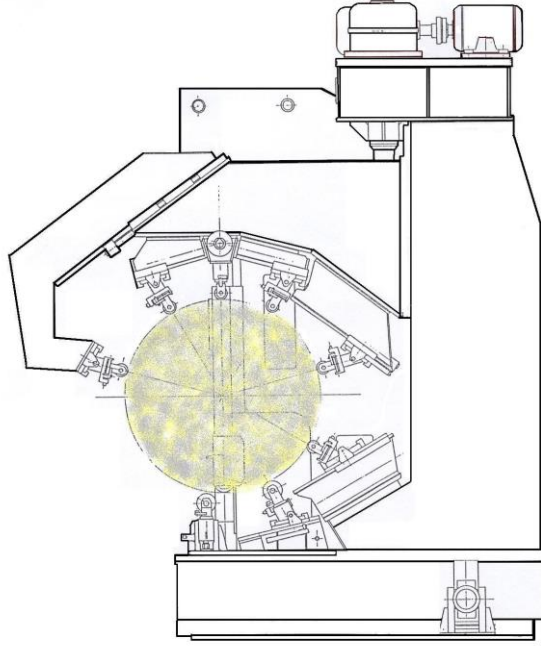
farklı yöntem kullanılmaktadır; birinci yöntem, bandın her iki tarafında bulunan ve iki farklı radyüse sahip role kullanımınıdır. Daha etkin olan ikinci yöntem ise, iki ayrı rolenin bandın alt tarafında bir diğer rolenin ise bandın üst tarafında olduğu üçlü role grubu kullanımınıdır. Üçlü role kullanımının üstünlükleri, malzeme, boru çapı ve makina açısına bağlı olarak bant kenarlarını istenilen her radyüste kıvrıma olanağı sağlamasıdır. Tüm bu işlemlerden sonra, biçim verme rollerinin yardımı ile banda spiral bir şekil verilir (Şekil 2.39). Bandın spiral olarak şekillendirme işlemi üçlü-kıvrırma role gruplarının yardımı ile yapılmaktadır. Tüm bu şekillendirme makaraları kendi içinde bir dizi bağımsız makaradan oluşmaktadır. Bu bağımsız makaraların her biri çalışma sırasında makina açısı ile eş açıda olacak şekilde ayarlanmalıdır.

Elde edilen borunun çap, ovallik ve doğrusallık gibi boyutsal hassasiyetini sağlayabilmek için üçlü role grubu ile yapılan şekillendirme sonrası kaynak işlemi tamamlanıncaya kadar, boruya verilmiş olan şeklin mutlaka korunması gereklidir. Bu ise ancak ek bir destek şekillendirme ya da koruma grubu tarafından sağlanmaktadır. Boruya dıştan temas eden dış kafes makara grubu (endüstriyel uygulamada deveboynu olarak ta adlandırılmaktadır) ya da borunun içine yerleştirilen malafa grubu ile sağlanmaktadır (Şekil 2.40). Spiral dikişli boru kaynağının ilk aşaması boruya spiral biçim verilen bölgede yapılan iç kaynaktır. Dış kaynak ise iç kaynaktan ayrı olarak daha ileri bir aşamada yapılır.

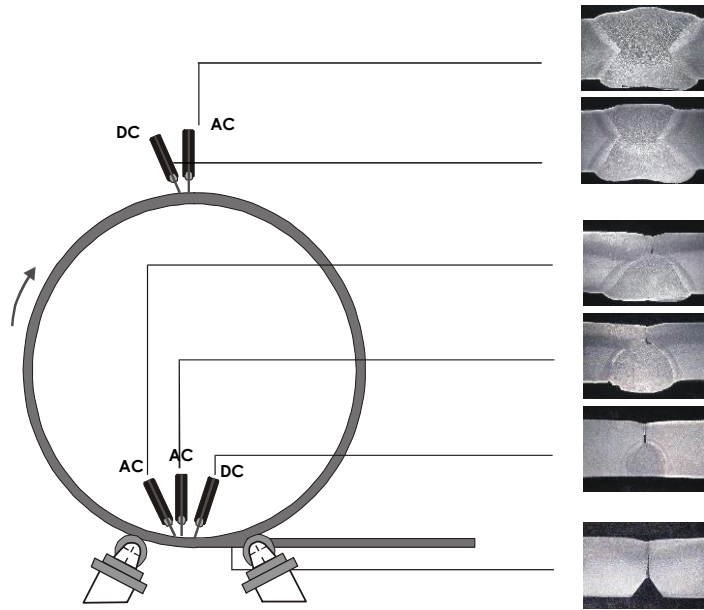


Şekil 2.39. Spiral dikişli boru makinasında banda silindirik biçim verme.

Kaynak işlemi tek ya da çoklu kafa kullanılarak yapılabilir (Şekil 2.41). Son aşama ise, borunun uygun boylarda kesilmesidir. Şekil 2.42 'de, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde kullanılan bir kaynak makinasının değişik aşamaları, Şekil 2.43 'de ise şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2.40. Biçim (form) verme ünitesi (deveboynu).



Şekil 2.41. Spiral dikişli boru üretiminde kaynak dikişinin oluşumu.



Genel görünüş



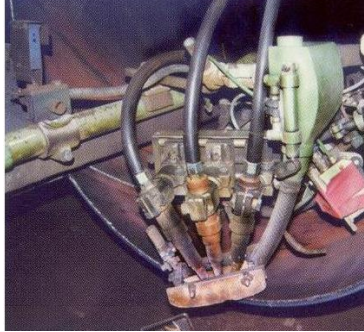
Bant kenar kesme



Spiral şekillendirme



Bant kenarlarının birleşmesi



İç kaynak



Dış kaynak

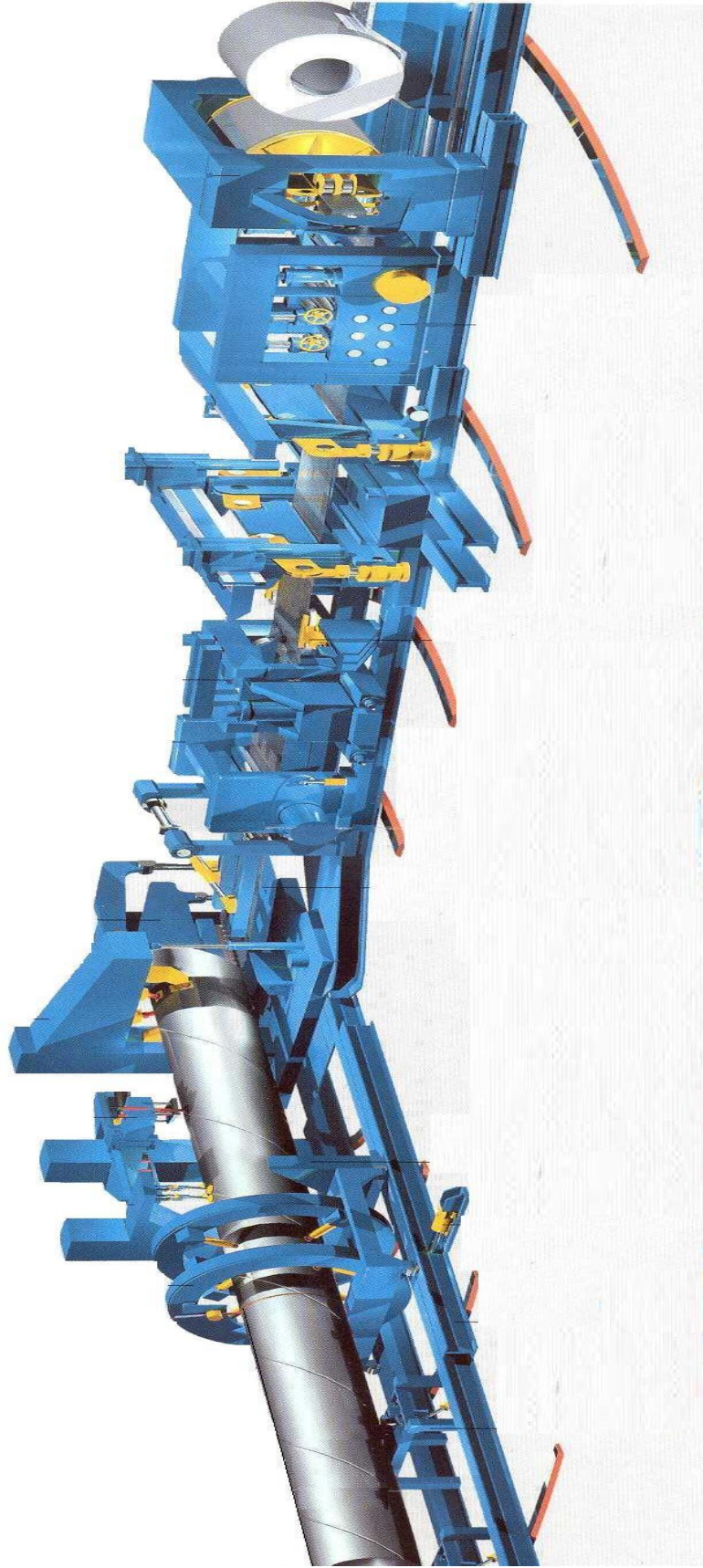


Ultrasonik kontrol



Plazma ile kesme

Şekil 2.42. Spiral dikişli boru üretim makinasının değişik aşamaları.



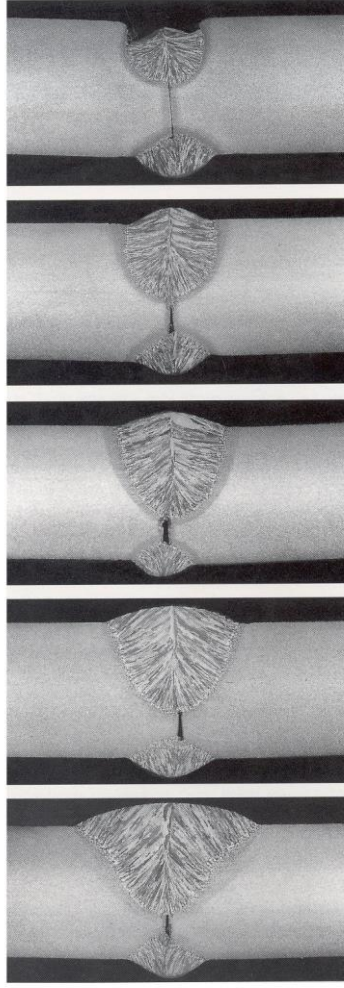
Şekil 2.43. Spiral dikişli boru üretim makinasının şematik gösterimi.

2.7.2. Boyuna dikişli boru üretim yöntemi

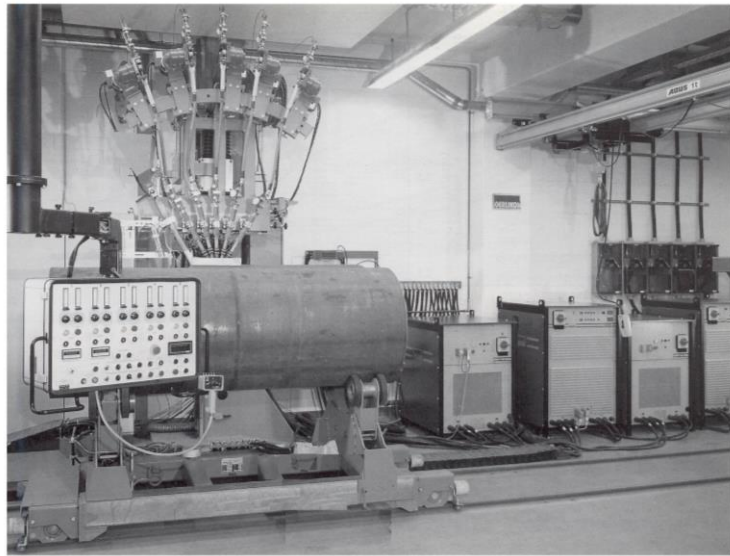
Gaz ve petrol iletim hatlarında, spiral dikişli borunun yanı sıra tozaltı kaynak yöntemi ile üretilen boyuna dikişli borular da oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, boru çapına uygun ölçülerde üretilmiş olan sac plakalar kullanılmaktadır. Söz konusu bu sac plakalar, özel yöntemlerle kıvrıldıktan sonra (U ve O kıvrırma), öncelikle oldukça yüksek bir hızda punto kaynağına tabi tutulmakta ve daha sonra, bağımsız istasyonlarda önce iç daha sonra dış kaynak yapılmaktadır. Gazaltı kaynak yöntemi ile yapılan punto kaynaklarında yaklaşık 6-7 m/dk gibi yüksek hızlara çıkıldığı için daha sonra yapılmakta olan iç ve dış kaynak istasyonlarının sayısı bu yüksek hızı karşılayacak sayıdadır (Mannesmann Röhrenwerke 1986). Şekil 2.44 'de boyuna dikişli bir gaz borusunda iç kaynağın oluşumu, Şekil 2.45 'de dış kaynağın yapıldığı kaynak istasyonu, Şekil 2.46 'da ise üretim aşamaları görülmektedir (Nies et al 1996). Bu yöntemin, spiral dikişli boru üretimine kıyasla bir dizi üstünlüğü vardır, bunlar;

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

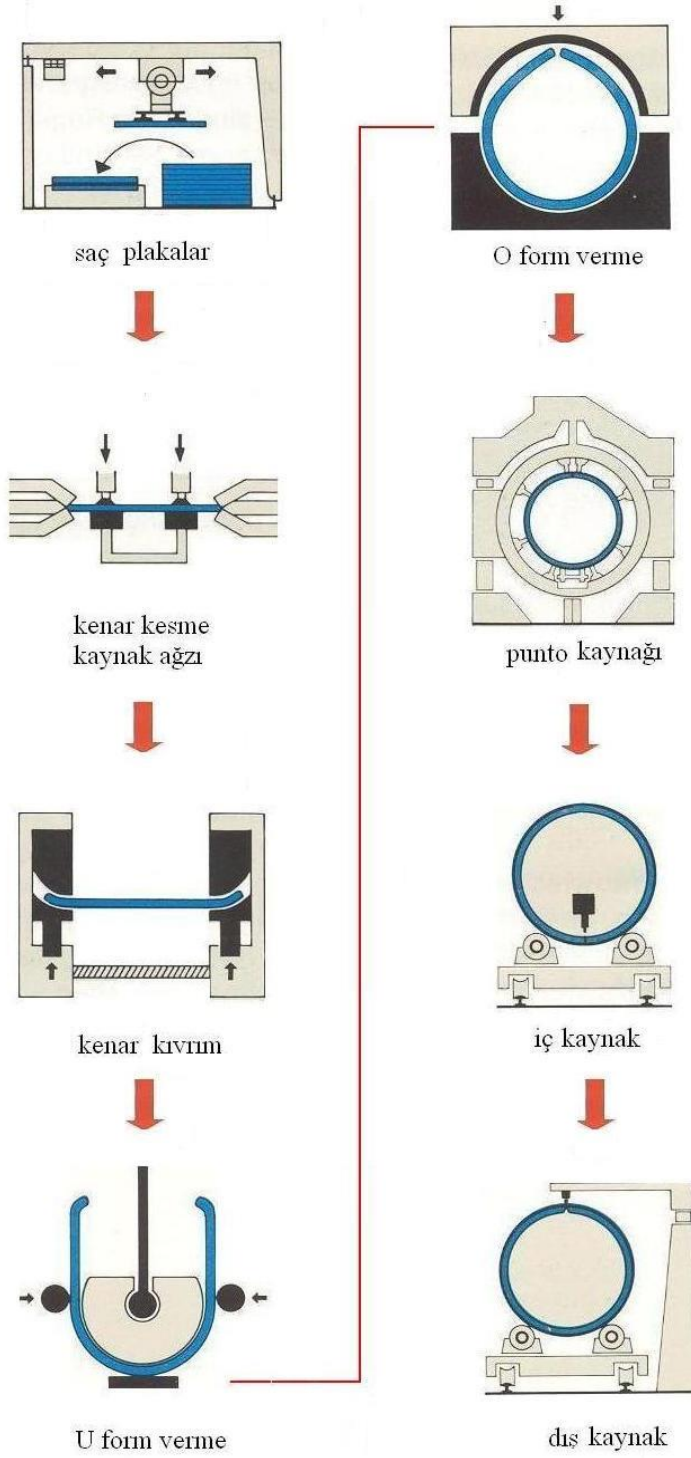
Ancak bu yöntemin yukarıda açıklanan tüm bu üstünlüklerinin yanı sıra, çok yüksek ve pahalı bir teknolojiye gereksinim göstermesi ve istenen ölçü ve kalınlıklarda sac plaka (yani hammadde) temininde zorlukların olması gibi bazı kısıtları da vardır.



Şekil 2.44. Boyuna dikişli borularda iç kaynağın oluşumu (Nies et al 1996)



Şekil 2.45. Dış kaynak istasyonu görünümü (Nies et al 1996).



Şekil 2.46. Tozaltı kaynak yöntemi ile boyuna dikişli gaz borusu üretim aşamaları.

BÖLÜM 3. ÇALIŞMANIN AMACI VE PLANLANMASI

3.1. Çalışmanın Amacı

Ekonomik nedenlerden dolayı, boru hatlarında yüksek basınçlarda çalışma gereksinimi, beraberinde borunun mukavemeti ve/veya kalınlığındaki artışları da kaçınılmaz hale getirmektedir. Aynı zamanda, hattın güvenliği açısından gerek boru gövdesinde gerekse kaynak dikişinde özellikle düşük sıcaklıklarda oldukça yüksek tokluk özellikleri istenmektedir. Yüksek basınçlarda hattın dayanıklılığı sadece borunun et kalınlığına ve malzemenin yapısına değil aynı zamanda kaynak dikişinin de kalitesine bağlıdır. Yüksek basınçlara güvenle cevap verebilecek kalite seviyesinin yakalanabilmesi için kaynak tekniğinin iyi bilinmesi ve buna bağlı olarak kaynak parametreleri seçiminin doğru bir şekilde yapılması gereklidir.

Ülkemizdeki boru fabrikalarında, kaynak parametrelerinin çoğu zaman deneme yanılma yöntemi ile saptandığı görülmektedir. Kaynak tekniğinin yeterince bilinmemesi nedeni ile kaynak güvenilirliği kaynak hızının düşük tutulması ile sağlanmaya çalışılmakta, bu ise hem verimliliğin düşmesine hem de maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Buradaki temel eksiklik, kaynak parametrelerinin seçimine yönelik bir yöntemin oluşturulamamasıdır. Bu düşünceden yola çıkarak, bu çalışmada özellikle yüksek çalışma basınçlarının etkisi altında kalan gaz iletim borularının tozaltı kaynak yöntemi ile üretiminde, olabilen en yüksek kaynak hızlarında yüksek kalite özelliklerinin elde edilmesine olanak sağlayacak bir şekilde kaynak parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Kaynak parametreleri seçimini ana hatlarıyla aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür;

- a) malzeme kalınlığı ve üretim standardına göre elde edilmek istenen kaynak dikişinin geometrik boyutlarının öngörülmesi,
- b) daha sonra bu dikişi elde edebilmek için seçilen kaynak hızına da bağlı olarak gereksinim duyulan tel miktarının belirlenmesi
- c) belirlenen bu miktardaki telin kaynak noktasına iletilmesi için elektriksel kaynak parametrelerinin düzenlenmesi şeklinde özetlemek olasıdır.

Kaynak öncesi kaynak parametrelerinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan tasarım çalışmalarında, malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilecek olan kaynak dikişinin yüksekliği, genişliği, nufuziyet derinliği ve kaynak kepi kesit alanı gibi geometrik büyüklüklerinin bilinmesi son derece önemlidir. Yapılan teorik çalışmada, her ne kadar kaynak dikiş geometrisine ait büyüklüklerle ilgili olarak bazı oranların verildiği görülse de, özellikle malzeme kalınlığına bağlı olarak ideal dikiş geometrisini veren herhangi bir bilgiye rastlanılmamıştır. Bu nedenle, yapılacak olan deneysel çalışmaların da yardımı ile malzeme kalınlığı ve üretim standartına bağlı olarak, kaynak dikişinin geometrik büyüklüklerinin öngörülmesine olanak sağlayacak ölçütler ve buna bağlı olarak formüllerin geliştirilmesine çalışılacaktır. İyi bir kaynak dikişinin elde edilebilmesi için, tel ilerleme hızı ile kaynak hızı arasındaki oranın doğru olması gerekir. Tel ilerleme hızının bilinmesi, telin erime hızını ya da diğer bir deyişle dolgu malzemesi yığıma hızını hesaplarken çok önemli bir temel oluşturur. Teorik olarak geliştirilmiş olan tel ergime miktarlarını veren formüllerin, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde kullanılabilirliği yine yapılacak olan deneysel çalışmalar yardımıyla belirlenecektir.

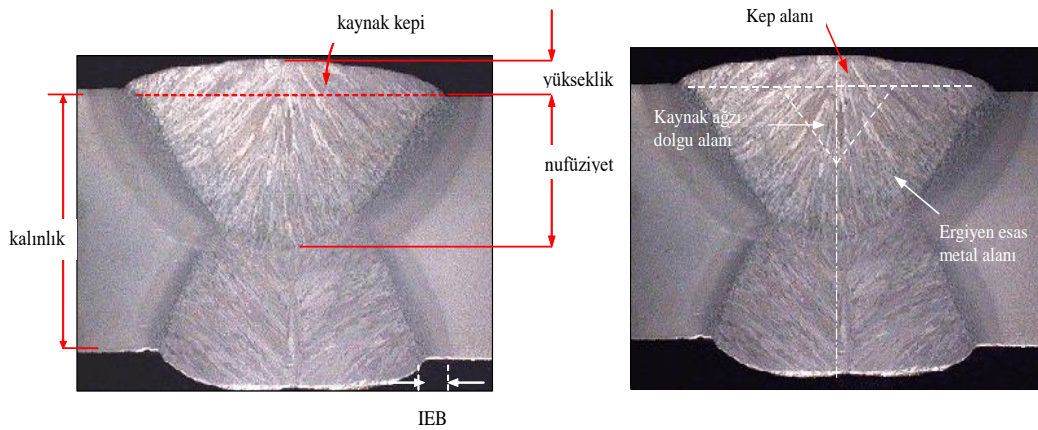
Bunların dışında, üretim hızını artırma, malzeme kalınlığına ve kalitesine bağlı olarak uygulanabilecek olan ısı girdisinin alt ve üst sınırlarını, kullanılacak olan kafa sayısı, her bir kaynak kafasında kullanılacak maksimum akım seviyeleri, kaynak parametreleri ile kaynak telinin kimyasal bileşiminin kaynak dikişinin tokluk özellikleri üzerindeki etkileri incelenecektir. Buradan elde edilen verilerin ışığı altında kaynak parametrelerinin seçimine olanak sağlayan bir bilgisayar programı yapılacaktır.

3.2. Deneysel Çalışmanın Planlanması

Deneysel çalışmalar genel olarak iki ana bölümde yapılacak olup; ilk bölümde, kaynak parametrelerinin kaynak dikiş geometrisi üzerindeki etkileri incelenecek, ikinci bölümde ise kaynak dikişinin tokluk özelliklerini etkileyen faktörler ele alınacaktır.

Kaynak akımı, ark gerilimi, tel çapı, kafa sayısı, kaynak ağız biçimi ve kaynak hızı gibi temel kaynak parametrelerinin, kaynak dikiş geometrisi üzerindeki etkisinin inceleneceği deneysel çalışmaların birinci bölümünde, değişik ebatlı borularda farklı parametrelerde çeşitli deneyler yapılarak, elde edilecek olan kaynak bağlantıları geometrik açıdan incelenecektir. Burada ele alınan geometrik büyüklükler toplam ergime kesit alanı (mm^2), kaynak kepi kesit alanı (mm^2), toplam dolgu alanı (mm^2), kaynak teli ile esas metalin karışım oranı (%) ile kaynak dikişinin genişliği, yüksekliği ve nufuziyet derinliği olacaktır (Şekil 3.1).

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde ise, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve kaynak metalinin soğuma hızı gibi kaynak dikişinin tokluk özelliklerini etkileyen faktörler incelenmesi amacıyla bir dizi deney yapılacaktır. Kaynak metalinin kimyasal bileşiminin kaynak dikişinin çentik darbe mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek için, aynı kaynak koşulları içinde farklı kimyasal bileşime sahip kaynak telleri kullanılacaktır; böylelikle, farklı alaşımlanma sonucunda kaynak metalinin kimyasal bileşiminin değişimine olanak sağlanmış olacaktır. Daha sonra, yapılan çentik darbe deneyleri yardımı ile çentik darbe mukavemeti ile kaynak metalinin kimyasal bileşimi arasındaki ilişki irdelenecektir. Kaynak dikişinin soğuma hızının etkisi ise, dış kaynak öncesi metal sıcaklığının değiştirilmesi ile farklı soğuma hızına sahip kaynak dikişinin oluşumu sağlanacaktır. Daha sonradan yapılan çentik darbe deneyleri ile de soğuma hızının kaynak dikişinin tokluk özeliği üzerindeki etkisi incelenecektir.









Şekil 3.1. Kaynak dikiş geometrisine ait büyüklükler.

3.3. Deney Ekipmanları ve Deneylerin Yapılışı

Deneyler, Mannesmann Boru End. T.A.Ş.- İzmit tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapıldığı kaynak makinası Mannesmann-Demag-1985 yılı yapımı olup, makinanın üretebileceği boru çap aralığı 323,8 ile 2540 mm, et kalınlığı ise 4,0 ile 21,0 mm arasındadır. Kaynak hızı ise 0,25 ile 3,20 m/d arasında değişmektedir. İç kaynakta üç kafa dış kaynakta ise iki kafa kullanım olanağı vardır. Makinanın kaynak sistemine ait tüm elektriksel araç ve gereçler Lincoln Electric tarafından tasarlanmıştır. DC redresörler maksimum 1200 A akım ile çalışırken, AC redresörler 385-895 A akım aralığında çalışmaktadır. Tel sürme işlemi, DC redresörlerde Lincoln NA-3 ve AC redresörlerde ise Lincoln NA-4 kontrol sistemi ile gerçekleştirilmektedir.

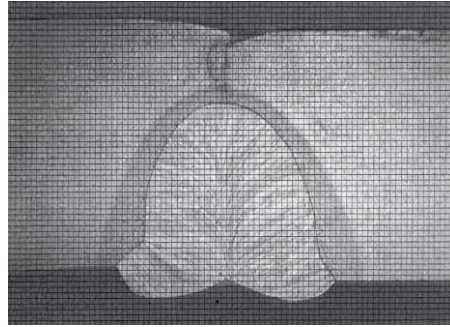
Kaynak parametrelerinin kaynak dikiş geometrisi üzerindeki etkisinin incelendiği deneysel çalışmaların birinci bölümünde, numune alma işlemi Tablo 3.1 'de verilen sıralamaya uygun olarak yapılmıştır. Üretim sırasında kaynak kafaları belirli bir sıra ile devre dışı bırakılarak kaynak dikişi oluşumunun her bir aşaması ayrı ayrı belirlenmiştir. Öncelikle, iç ve dış kaynak sonrası numune alınmıştır. Daha sonra, dış kaynak AC devre dışı bırakılmış ve bir süre bu şekilde kaynağa devam edildikten sonra bu bölgeden numune alınmıştır. Bu numune, iç kaynak sonrası dış DC akımının oluşturduğu kaynaklı bölgeyi temsil etmektedir. Bir sonraki aşamada ise, dış kaynak DC 'nin devre dışı bırakılmasıyla elde edilen numune ise sadece iç kaynaklı bölgeyi temsil etmektedir.

Tablo 3.1. Kaynak dikişinden numune alma işlemi.

Sıra	Yapılan İşlem	Numunenin Temsil Ettiği Bölge	
1		Normal kaynak	
2	Dış kaynak AC devre dışı	Dış kaynak DC sonrası	
3	Dış kaynak DC devre dışı	İç kaynak II.AC sonrası	
4	İç kaynak II.AC devre dışı	İç kaynak I.AC sonrası	
5	İç kaynak I.AC devre dışı	İç kaynak DC sonrası	
6	İç kaynak DC devre dışı	İç kaynak öncesi	

Bu işlem iç kaynak DC kafanın devre dışı bırakılmasına kadar devam ettirilerek, kaynak dikişinin her bir oluşum aşamasına ait olan kaynak dikişi numunesi elde edilmiştir. Bir sonraki aşamada, yukarıda açıklanan yöntem ile yapılan deneme çalışmalarından elde edilen numunelerden, bilgisayar yardımı ile ölçekli kaynak görüntüleri çıkarılarak (Şekil 3.2) geometrik ölçümler yapılmıştır.

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde ki çentik darbe deneyleri, maksimum darbe işi 300 J ve çarpma hızı 5,42 m/s olan bir cihaz yardımı ile yapılmış olup, çentik darbe deney numuneleri DIN 50115 'e göre sivri çentikli ISO-V şeklinde hazırlanmıştır. Numune soğutması sıvı banyo içinde $\pm 0,5$ °C hassasiyet ile yapılmış olup, sıvı banyo içinde tutulma süresi yedi dakikadır. Numuneler cihaza, çentik eksenine mesnet açıklığının tam ortasında ve çentikli yüzün çekicinin vuracağı yüzün ters tarafında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deneylerde, sürekli döküm yolu ile imal edilmiş ve termomekanik haddelemeye tabi tutulmuş hidrojen kırılabilirliğine karşı yüksek dirençli X-65 çeliği kullanılmıştır. Deneyler sırasında kullanılan kaynak tellerinin kimyasal bileşimi Tablo 3.2 'de verilmiştir. AB türü hafif bazik esaslı (BI=1.6) kaynak tozu kullanılmıştır (EK-1).



Şekil 3.2. Ölçekli kaynak görüntüsü.

Tablo 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaynak tellerinin kimyasal bileşimi.

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	Ti	B
S2Mo	0,11	0,89	0,16	0,04	0,04	0,50	0,02	0,010	0,01		
S3Mo	0,10	1,62	0,15	0,05	0,04	0,49	0,04	0,006	0,01		
S3MoTiB	0,07	1,27	0,29	0,04	0,03	0,51	0,03	0,004	0,01	0,15	0,013

* Tüm teller için P<%0,010 ve S<%0,010

BÖLÜM 4. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR VE DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Deneysel çalışma genel olarak iki ana bölümde yapılmıştır. İlk bölümde, kaynak parametrelerinin kaynak dikiş geometrisi üzerindeki etkileri incelenmiş, ikinci bölümde ise kaynak dikişinin tokluk özelliklerini etkileyen faktörler ele alınmıştır.

4.1. Kaynak Parametrelerinin Kaynak Dikiş Geometrisi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Deneysel çalışmalarının ilk aşamasında, öncelikle 1016x17,7 mm ebatlı boruda 1.80 m/dk 'lık kaynak hızında, Tablo 4.1 'de verilen kaynak parametreleri ile kaynak yapılmıştır (Deney 1). Bu koşullar altındaki kaynak dikişinin oluşumu Şekil 4.1 'de verilmiştir. Daha sonra, tüm diğer parametreler sabit tutularak kaynak hızı önce 1.50 m/dk (Deney 2) ve sonrasında da 1.20 m/dk (Deney 3) değerine düşürülmüş ve elde edilen kaynak dikişi geometrik incelemeye tabi tutulmuştur (Şekil 4.2 ve 4.3).

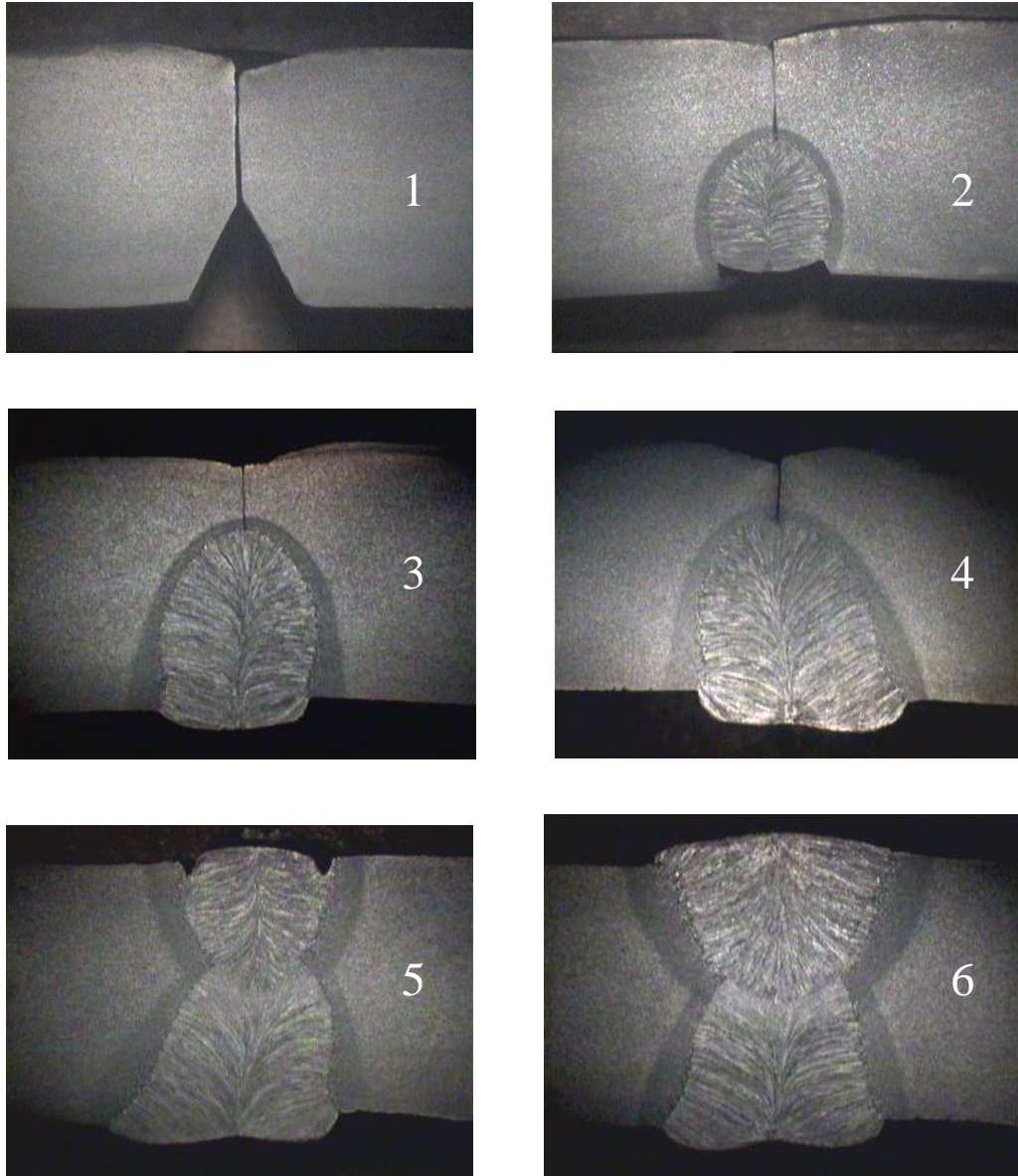
Deneysel çalışmalarının ikinci aşamasında, 914x11,1 mm ebatlı boruda Tablo 4.4 'de verilen parametrelerle (Deney 4) kaynak yapılmış (Şekil 4.5) ve daha sonra, kaynak hızı sabit kalacak şekilde iç kaynaktaki kafa sayısı ve elektriksel kaynak parametreleri değiştirilmiştir (Deney 5). Bu deneye ait kaynak parametreleri Tablo 4.5 'de, kaynak dikişinin oluşum aşamaları ise Şekil 4.6 'da verilmiştir. Üçüncü aşamada, 1067x14,27 mm ebatlı boru Tablo 4.6 'da verilen kaynak parametreleri ile kaynak edilmiş olup (Deney 6), elde edilen kaynak dikişi Şekil 4.8 'de verilmiştir. Daha sonra, kaynak hızı 1.50 m/dk 'dan 1.65 m/dk 'ya çıkarılmış (Deney 7), elektriksel kaynak parametreleri ise buna uygun olarak yeniden düzenlenmiştir (Tablo 4.7 ve Şekil 4.9). Bir sonraki adımda ise, iç kaynaktaki kafa sayısı azaltılarak ikiye düşürülmüş ve kaynak hızı 1.40 m/dk olarak değiştirilmiştir (Tablo 4.8 ve Şekil 4.10).

Çevresel kaynak işlemlerinde, kaynak noktasının yeri kaynak dikişinin biçimi üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Bu amaçla, deney 8 'de ki kaynak parametreleri sabit tutularak sadece iç kaynak noktasının yeri değiştirilmiştir (Şekil 4.11). Her iki durumda elde edilen iç kaynak dikişi geometrik açıdan incelenmiştir (Deney 9). Gaz borusu üretimi için 2,30 m/dk gibi oldukça yüksek sayılabilecek kaynak hızının denendiği 1422x12,5 mm ebatlı borunun kaynak parametreleri ise Tablo 4.10 'da ki gibi olup, kaynak dikişinin oluşumu Şekil 4.14 'de verilmiştir (Deney 10). Seri üretim durumunda mekanik ve elektriksel olarak ele alınan parametrelerde sürekli bir salınım söz konusudur. Söz konusu bu salınımlar (değişimler) elde edilen kaynak dikiş geometrisinde de belirli bir değişime neden olabilir. Sabit parametreler altında yapılan kaynak işleminde, kaynak dikişi geometrisinde ki değişimleri görebilmek için 1067x10,31 mm ebatlı bir borunun beş farklı bölgesinden alınan numuneler geometrik olarak incelenmiştir (Deney 11).

1016x8,8 mm ebatlı boruda ısı girdisi aynı kalacak şekilde elektriksel kaynak parametreleri ve kaynak hızı değiştirilerek, bu koşullar altında elde edilen kaynak dikişi incelenmiştir. Burada, iç kaynak sürekli olarak aynı elektriksel kaynak parametreleri ile yapılırken, sadece dış kaynak parametreleri değiştirilmiştir. Dış kaynaktaki ısı girdisi yaklaşık 1087 J/mm olacak şekilde, önce 1,65 m/dk ve daha sonra 2.60 m/dk kaynak hızı ile Tablo 4.12 'de verilen parametrelere uygun olarak kaynak işlemi yapılmıştır (Deney 12). Kaynak dikiş görüntüleri ise Şekil 4.16 'da verilmiştir. Akım şiddetinin kaynak kafalarındaki dağılımının kaynak dikiş geometrisi üzerindeki etkisini görebilmek için, 914x11,1 mm ebatlı boruda iç kaynak 1.AC ile 2.AC kafalardaki akım şiddetlerinin yeri değiştirilerek kaynak yapılmış ve elde edilen kaynak dikişi incelenmiştir (Deney 13). Ayrıca, su ve kazık boruları gibi kaynak dikişinde X-Ray kontrolünün gerekli olmadığı borularda, ulaşılabilecek maksimum kaynak hızını görebilmek için 1016x9,8 mm ebatlı boru 3.00 m/dk kaynak hızı ile kaynak edilmiştir (Deney 14). Çalışmanın son bölümünde, Europipe 'ın 969x27,20 mm ile 1067x17,48 mm ebatlı boyuna dikişli gaz borularına ait kaynak parametreleri incelenmiştir. Elde edilen kaynak dikişlerine ait geometrik ölçüm sonuçları Tablo 4.15 'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney 1 'e ait kaynak parametreleri (1016x17,7 mm, 1,80 m/dk).

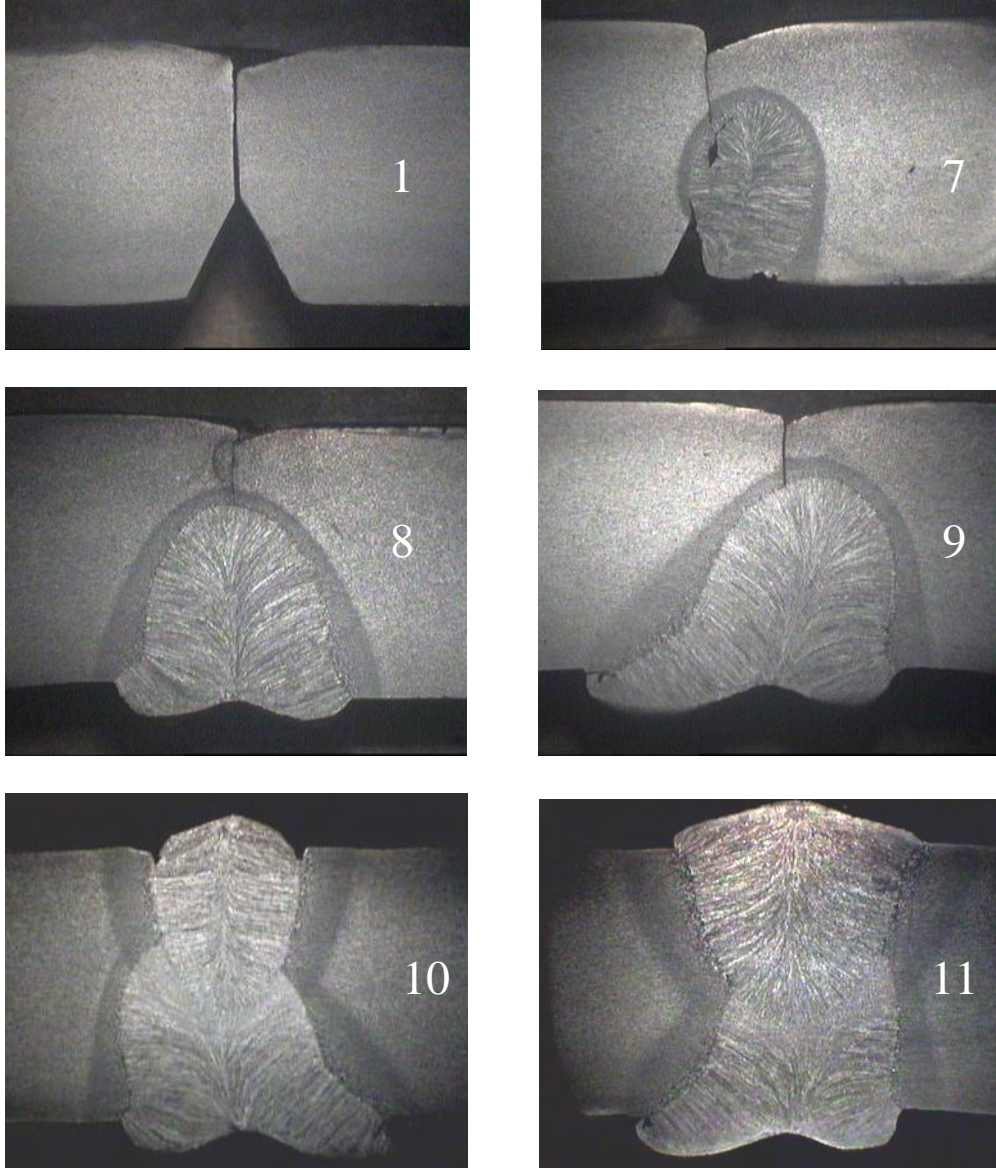
	İç kaynak				Dış kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça No	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça No	
DC	1100	30	4,0	2	1100	30	4,0	5	1,80
AC	850	30	3,2	3	750	30	3,2	6	
AC	550	30	3,2	4					



Şekil 4.1. Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 1).

Tablo 4.2. Deney 2 'ye ait kaynak parametreleri (1016x17,7 mm, 1,50 m/dk).

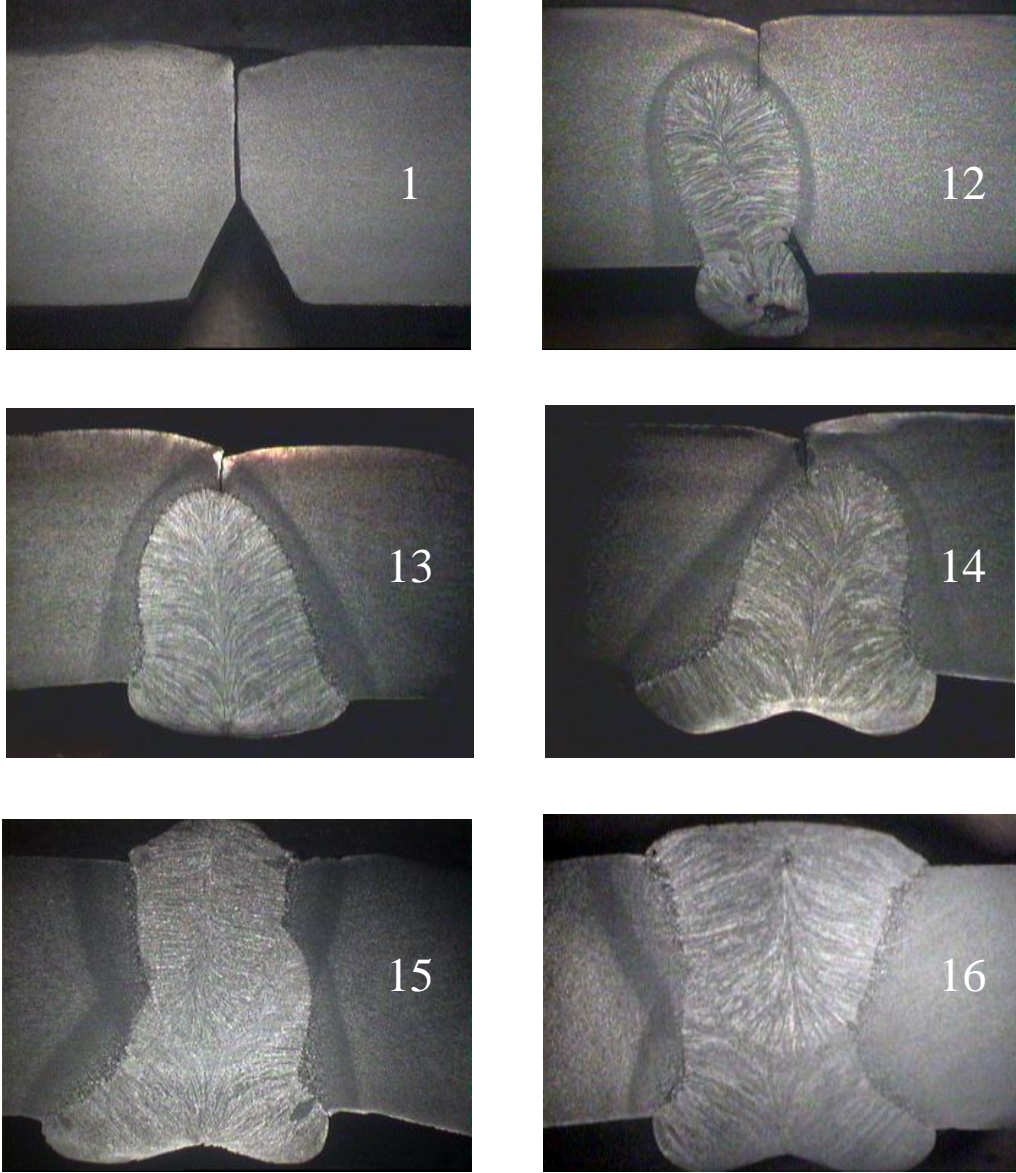
	İç kaynak				Dış kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	
DC	1100	30	4,0	7	1100	30	4,0	10	1,50
AC	850	30	3,2	8	750	30	3,2	11	
AC	550	30	3,2	9					



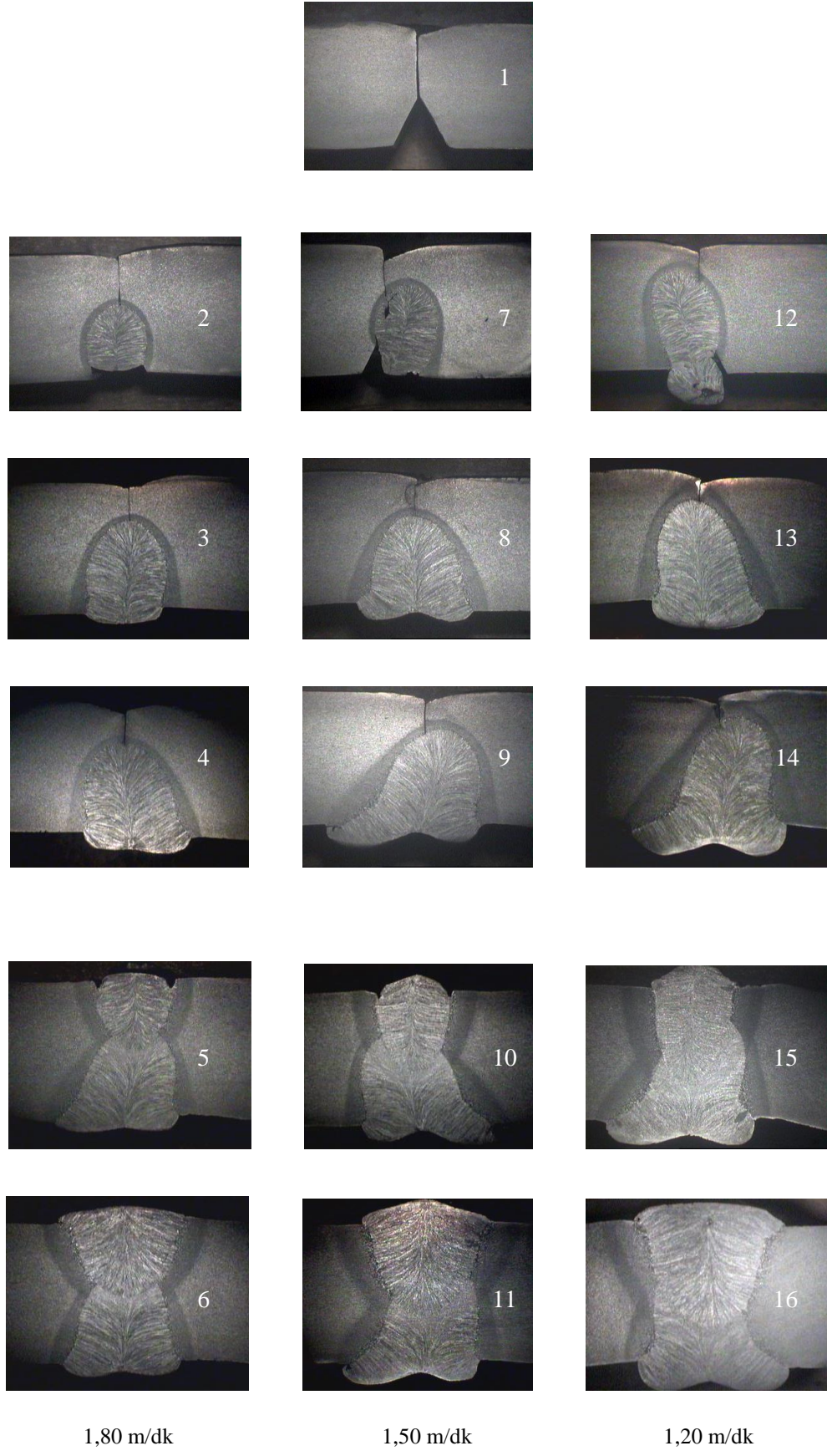
Şekil 4.2. Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 2).

Tablo 4.3. Deney 3 'e ait kaynak parametreleri (1016x17,7 mm, 1,20 m/dk).

	İç kaynak				Dış kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	
DC	1100	30	4,0	12	1100	30	4,0	15	1,20
AC	850	30	3,2	13	750	30	3,2	16	
AC	550	30	3,2	14					



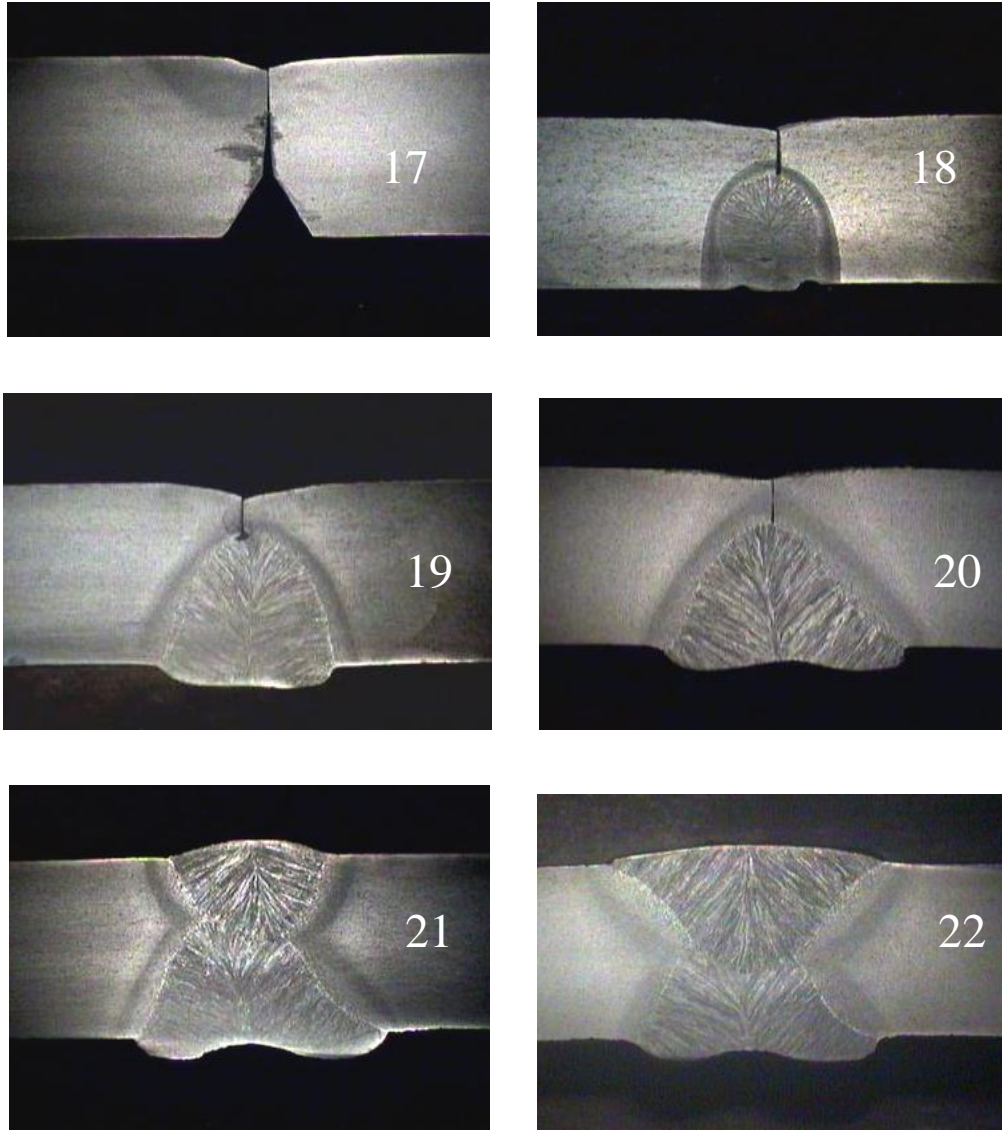
Şekil 4.3. Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 3).



Şekil 4.4. 1016x17,7 mm ebatlı boruda kaynak dikişinin oluşumu.

Tablo 4.4. Deney 4 'e ait kaynak parametreleri (914x11,1 mm, üç kafa).

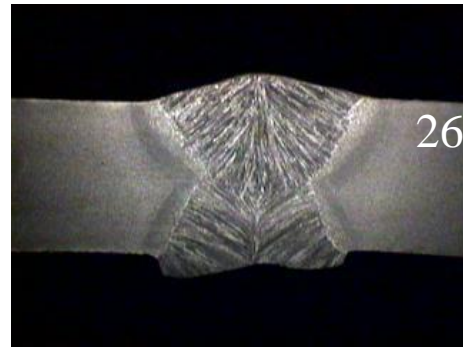
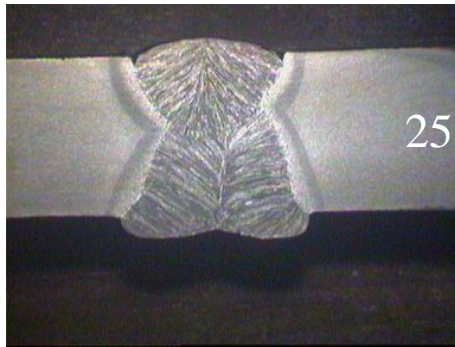
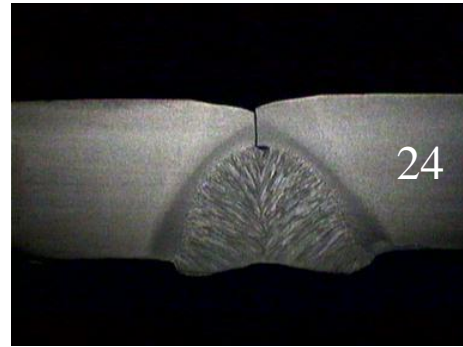
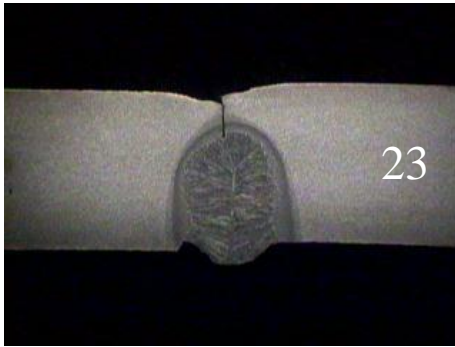
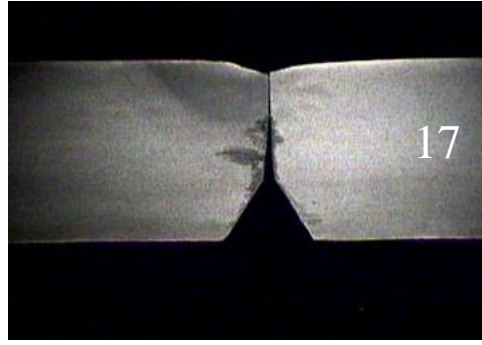
	İç kaynak				Dış kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	
DC	850	28	4,0	18	850	30	4,0	21	2,20
AC	725	28	3,2	19	625	30	3,2	22	
AC	450	30	3,2	20					



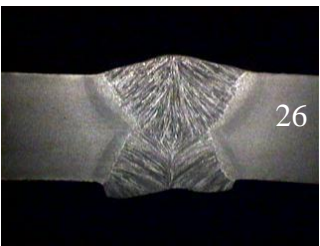
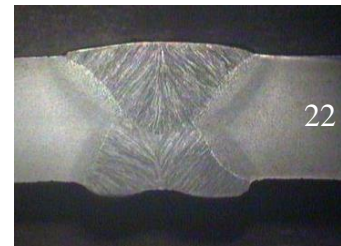
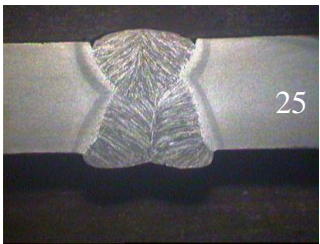
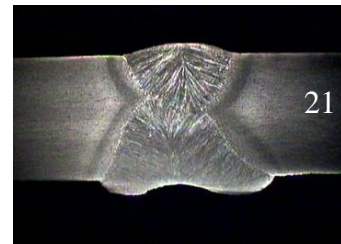
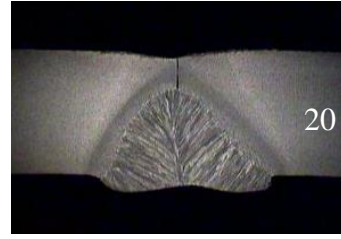
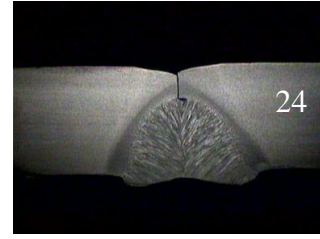
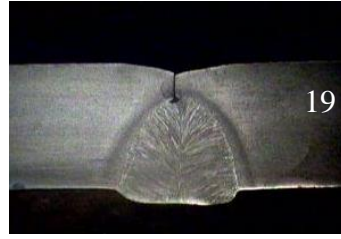
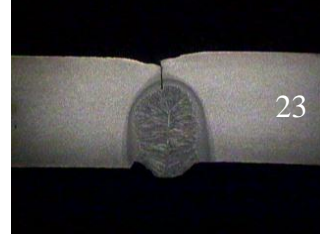
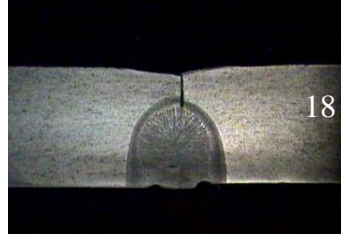
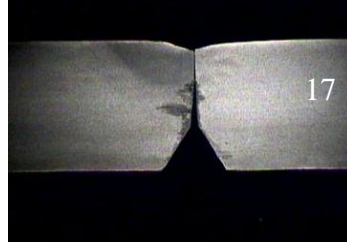
Şekil 4.5. Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 4).

Tablo 4.5. Deney 5 'e ait kaynak parametreleri (914x11,1 mm, iki kafa).

	İç kaynak				Dış kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	
DC	1000	29	4,0	23	875	30	4,0	25	2,20
AC	775	29	3,2	24	600	30	3,2	26	
AC									



Şekil 4.6. Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 5).



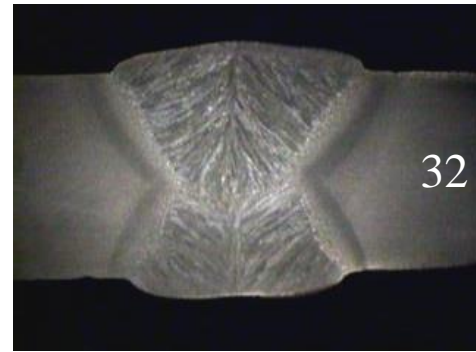
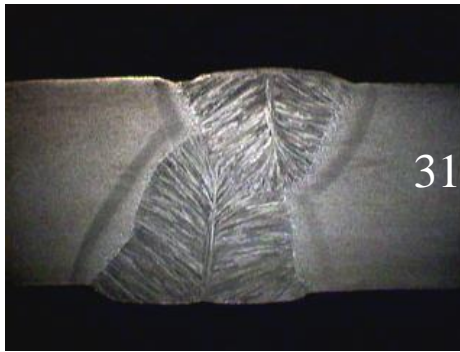
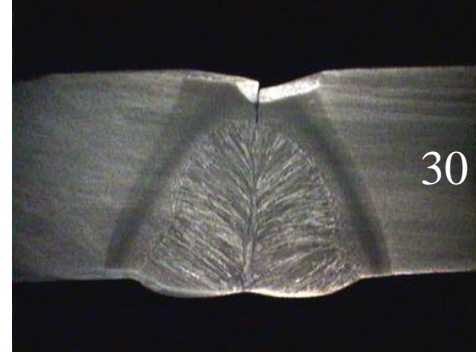
üç kafa

iki kafa

Şekil 4.7. 914x11,1 mm ebatlı boruda kaynak dikişinin oluşumu.

Tablo 4.6. Deney 6 'ya ait kaynak parametreleri (1067x14,27 mm).

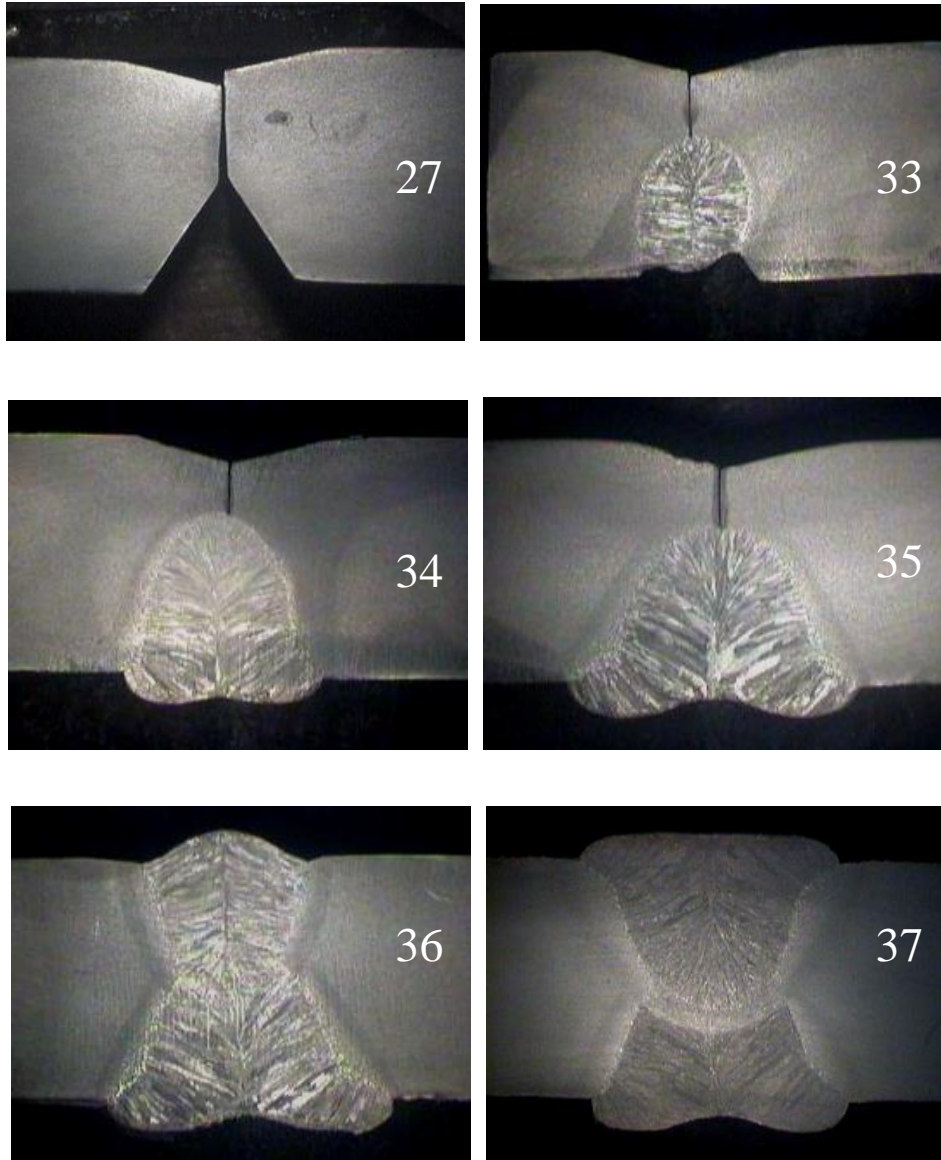
	İç kaynak				Dış kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	
DC	750	28	3,2	28	825	30	4,0	31	1,50
AC	650	28	3,2	29	650	30	3,2	32	
AC	450	30	3,2	30					



Şekil 4.8. Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 6).

Tablo 4.7. Deney 7 'ye ait kaynak parametreleri (1067x14,27 mm).

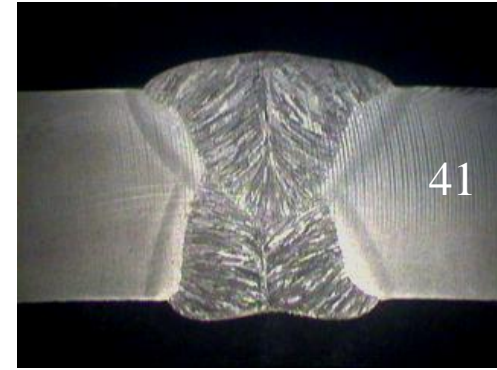
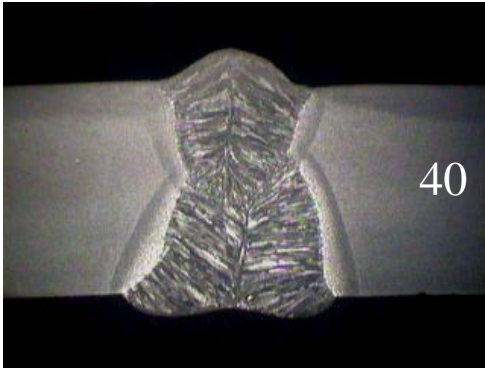
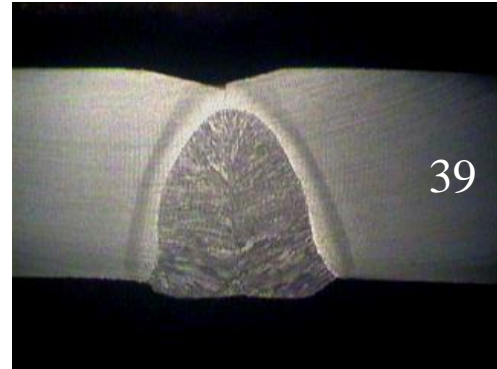
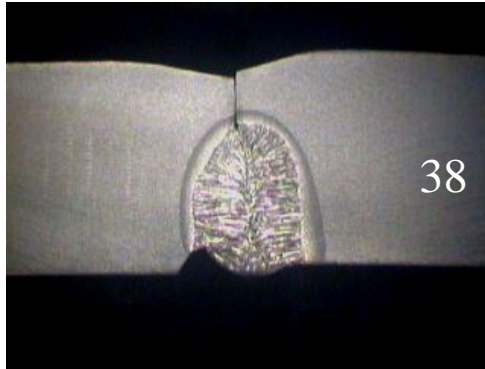
	İç kaynak				Dış kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	
DC	875	27	3,2	33	800	29	4,0	36	1,65
AC	775	27	3,2	34	600	29	3,2	37	
AC	550	28	3,2	35					



Şekil 4.9. Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 7)

Tablo 4.8. Deney 8 'e ait kaynak parametreleri (1067x14,27 mm).

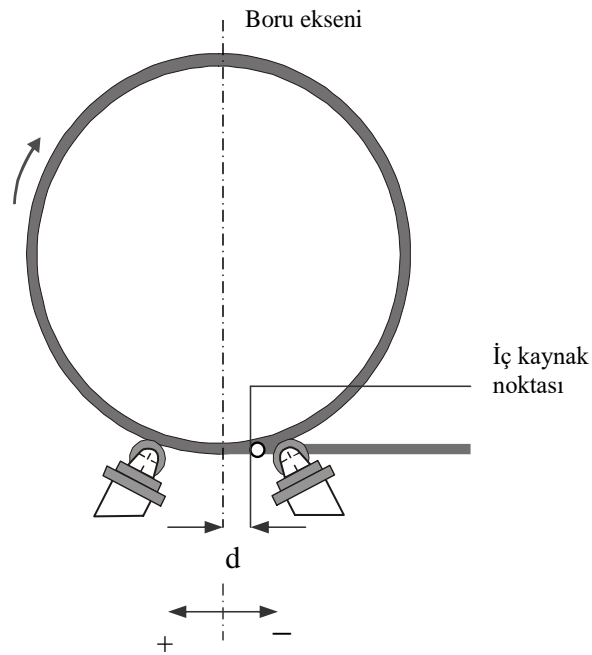
	İç kaynak				Dış kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	
DC	875	29	3,2	38	750	29	3,2	40	1,40
AC	750	29	3,2	39	650	29	3,2	41	
AC									



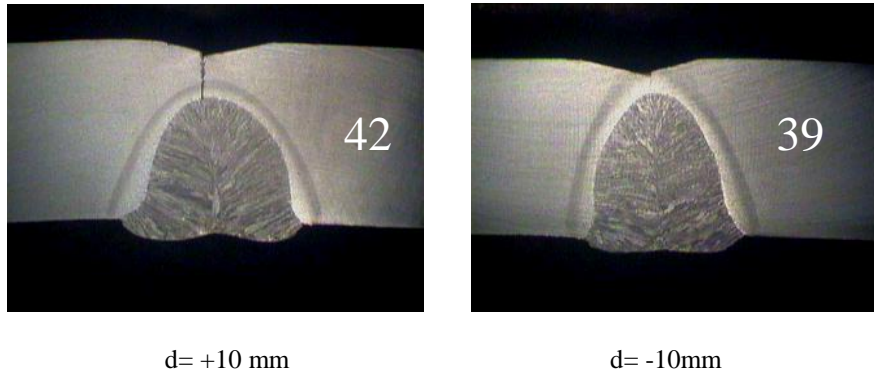
Şekil 4.10. Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 8)

Tablo 4.9. Deneý 9 'a ait kaynak parametreleri.

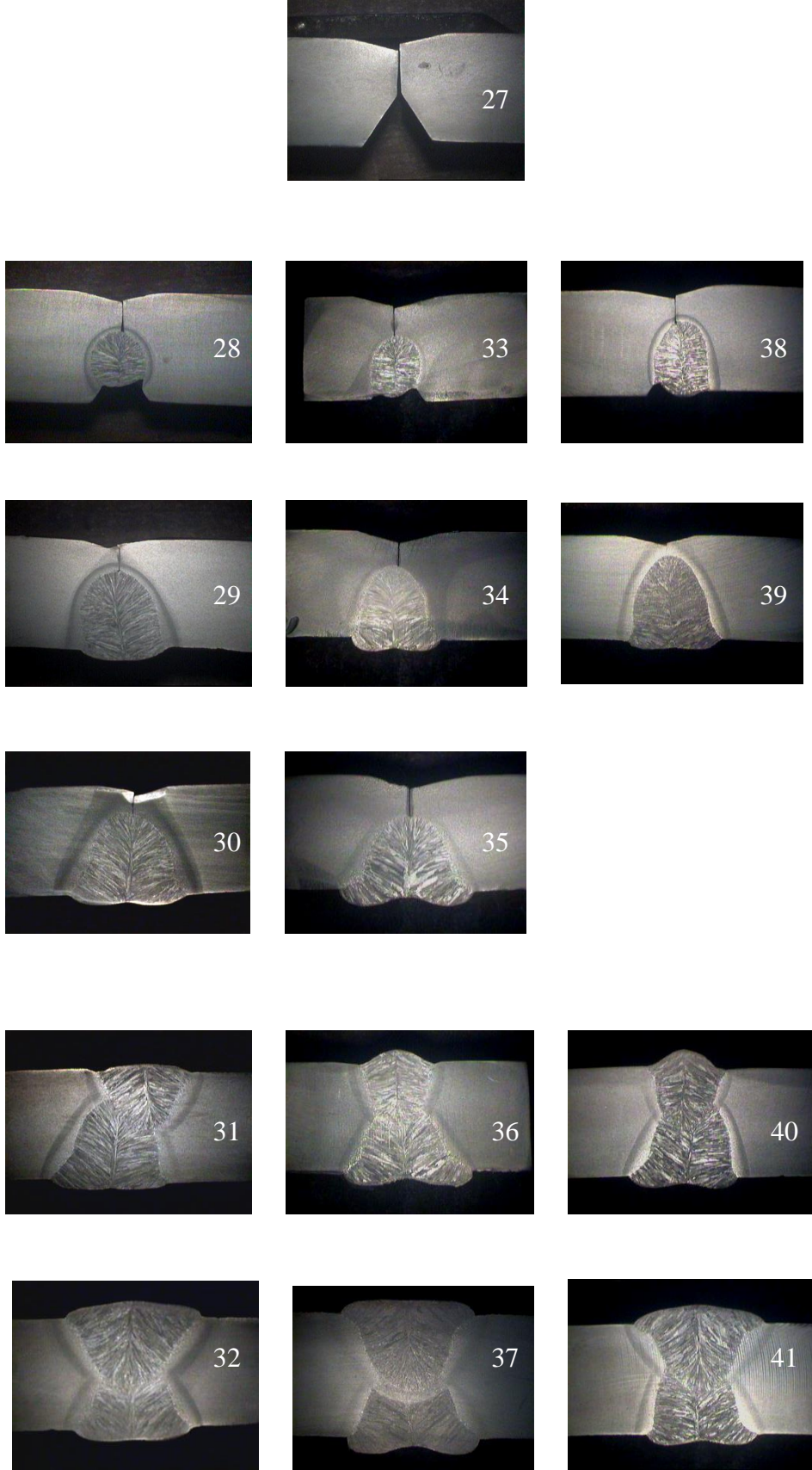
	İç Kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deneý parça no	
DC	875	29	4,0	39 - 42	1,40
AC	750	29	3,2		



Şekil 4.11. İç kaynak noktasının pozisyonu (Deneý 8 ve 9).



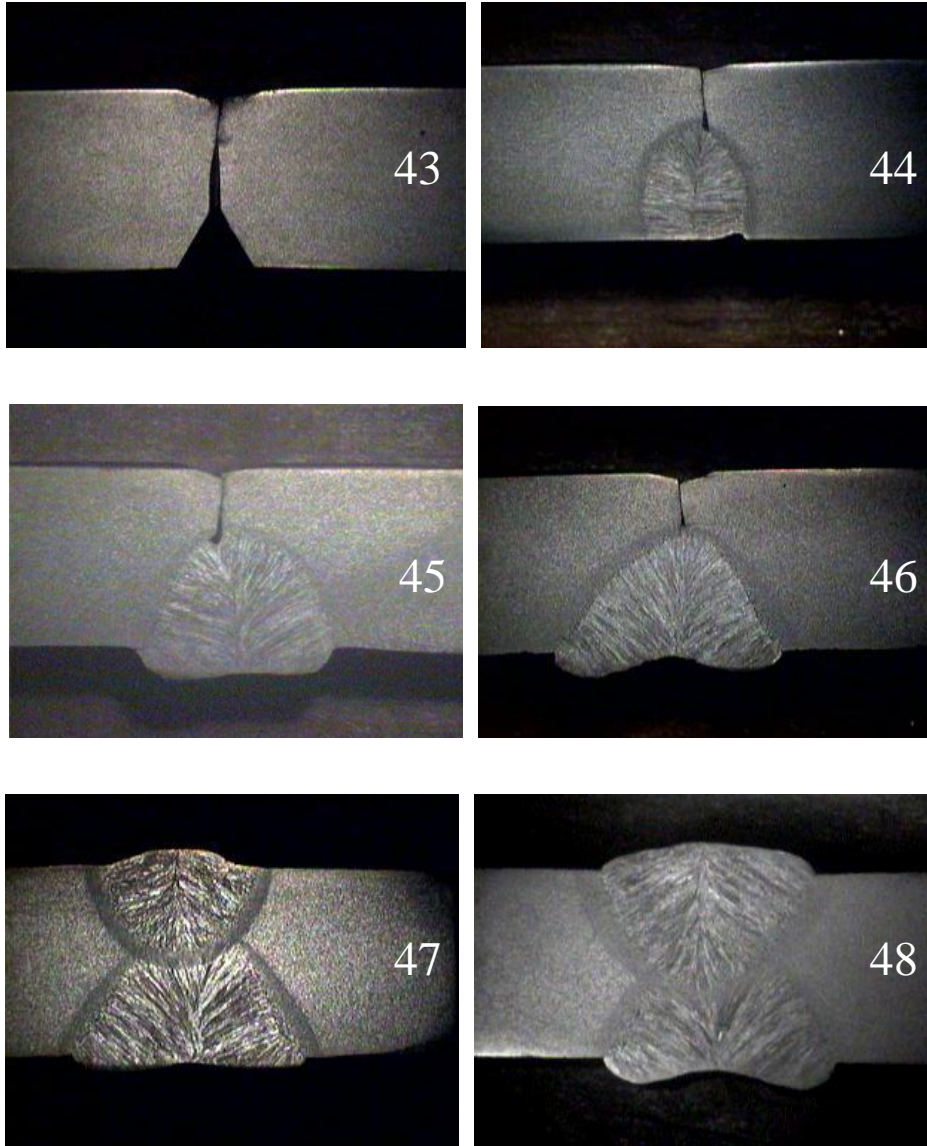
Şekil 4.12. İç kaynak noktasının yerine bağlı olarak kaynak dikiş biçiminin değişimi (Deneý 8 ve 9).



Şekil 4.13. 1067x14,27 mm ebatlı boruda kaynak dikişinin oluşumu.

Tablo 4.10. Deney 10 'a ait kaynak parametreleri (1422x12,5 mm).

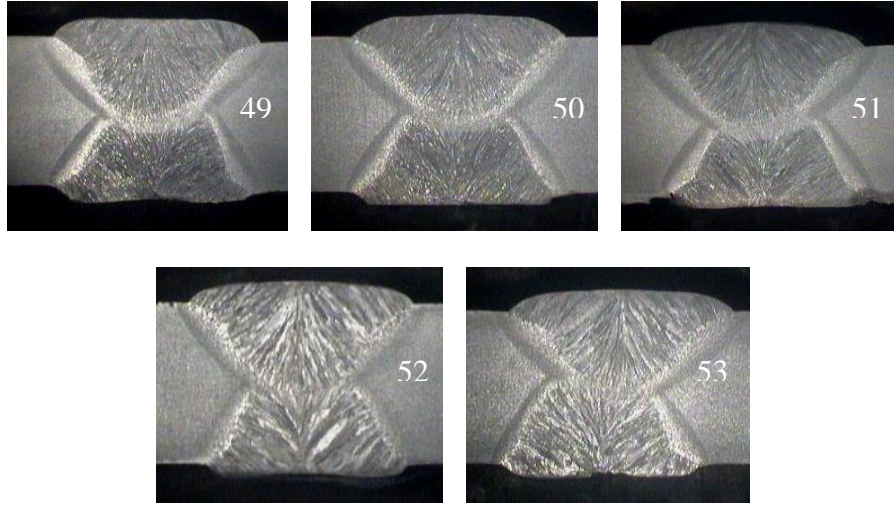
	İç kaynak				Dış kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	
DC	900	28	3,2	44	900	30	4,0	47	2,30
AC	800	28	3,2	45	800	30	3,2	48	
AC	500	30	3,2	46					



Şekil 4.14. Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 10).

Tablo 4.11. Deney 11 'e ait kaynak parametreleri (1067x10,31 mm).

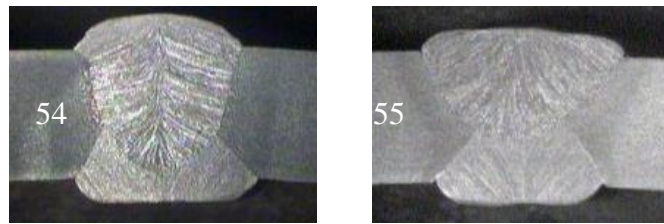
	İç Kaynak			Dış Kaynak			Kaynak hızı (m/dk)	Deney parça no
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)		
DC	850	29	4,0	900	28	4,0	2,00	49-53
AC	600	29	3,2	500	29	3,2		



Şekil 4.15. Kaynak dikişine ait farklı görüntüler (Deney 11).

Tablo 4.12. Deney 12 'ye ait dış kaynak parametreleri (1016x8,8 mm).

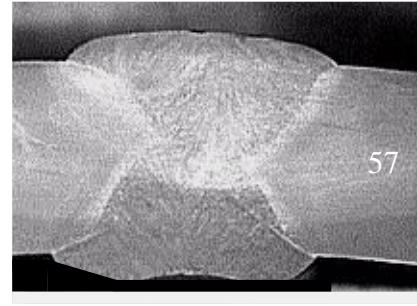
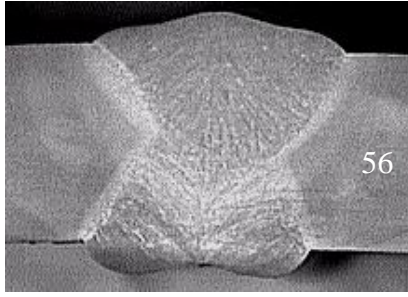
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Kaynak hızı (m/dk)	Deney parça no
DC	1000	30	3,2	1,65	54
DC	1000	30	3,2	2,60	55
AC	565	30	3,2		



Şekil 4.16. Kaynak dikişinin görünümü (Deney 12).

Tablo 4.13. Deney 13 'e ait iç kaynak parametreleri (914x11,1 mm).

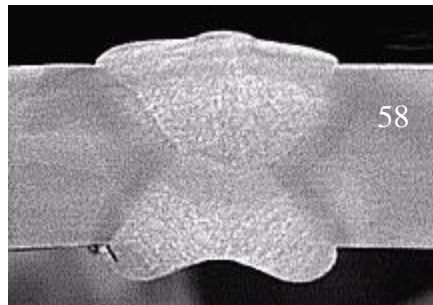
	İç kaynak				Dış kaynak				Kaynak hızı (m/dk)
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Deney parça no	
DC	700	28	3,2	56	700	28	3,2	57	1,80
AC	600	28	3,2		460	28	3,2		
AC	460	30	3,2		600	30	3,2		



Şekil 4.17. Kaynak dikişi görüntüleri (Deney 13)

Tablo 4.14. Deney 14 'e ait kaynak parametreleri (1016x9,8 mm).

	İç Kaynak			Dış Kaynak			Kaynak hızı (m/dk)	Deney parça no
	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)		
DC	880	29	4,0	900	30	4,0	3,00	58
AC	800	29	3,2	800	30	3,2		
AC	500	30	3,2					



Şekil 4.18. Kaynak dikişi görüntüsü (Deney 14)

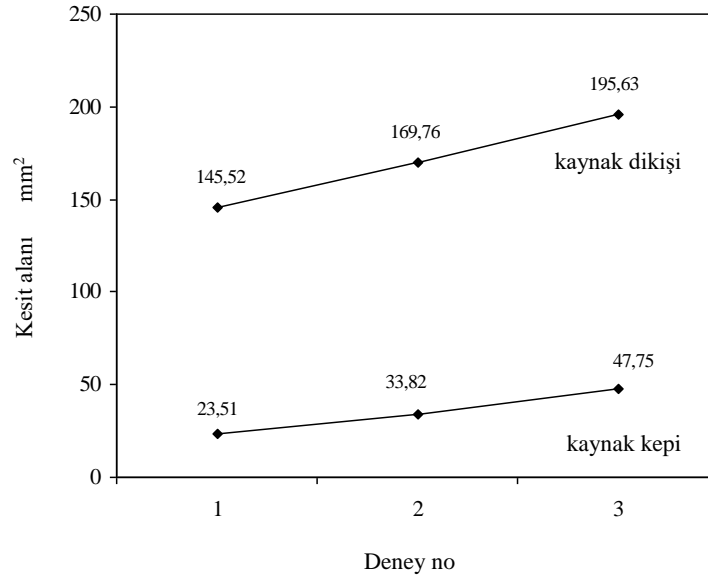
Tablo 4.15. Kaynak dikiş geometrik ölçüm sonuçları.

Deneysel parça no	İç dikiş kesit alanı (mm ²)	Dış dikiş kesit alanı (mm ²)	Nüfuziyet derinliği (mm)	Kaynak kep alanı (mm ²)	Dikiş yüksekliği (mm)	Dikiş genişliği (mm)
1	24,71	10,48				
2	60,94		7,95			
3	121,40		11,53			
4	145,52		11,79	23,51	1,96	15,41
5		77,88	8,63			
6		120,81	9,20	21,37	1,86	16,04
7	84,02		12,07			
8	142,40		12,19			
9	169,76		12,38	33,82	2,45	18,26
10		92,32	10,74			
11		153,11	11,41	29,41	2,56	16,11
12	134,20		13,32			
13	176,03		13,57			
14	195,63		13,73	47,75	3,24	19,71
15		126,86	12,78			
16		187,24	12,84	37,71	2,82	18,77
17	12,05	3,86				
18	42,94		7,37			
19	79,81		8,17			
20	91,42		8,40	16,15	1,40	15,40
21		40,00	5,29			
22		79,01	7,68	15,36	1,27	16,97
23	47,28		7,69			
24	83,73		8,03	14,95	1,37	14,03
25		50,77	5,71			
26		86,58	7,90	15,29	1,49	13,43
27	27,42	6,16				

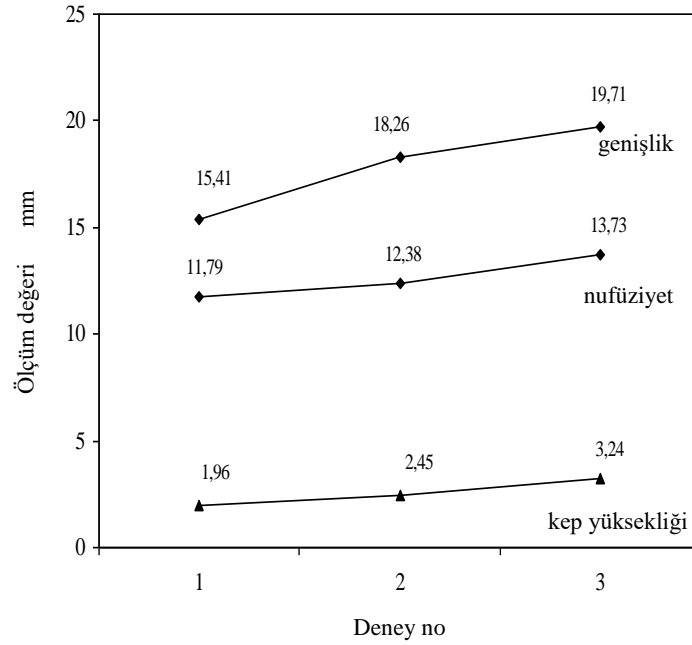
Tablo 4.15 (Devam). Kaynak dikiş geometrik ölçüm sonuçları.

Deney parça no	İç dikiş kesit alanı (mm ²)	Dış dikiş kesit alanı (mm ²)	Nufuziyet derinliği (mm)	Kaynak kep alanı (mm ²)	Dikiş yüksekliği (mm)	Dikiş genişliği (mm)
28	42,09		7,34			
29	97,58		10,05			
30	123,23		10,33	14,61	1,27	15,49
31		68,16	8,12			
32		117,69	9,14	26,00	1,99	17,82
33	44,25		8,71			
34	87,68		9,10			
35	108,96		9,16	20,77	1,76	16,84
36		64,12	8,11			
37		101,02	9,02	18,11	1,54	15,19
38	58,53		9,85			
39	115,25		11,55	13,06	1,36	12,59
40		68,47	8,08			
41		103,28	8,71	25,38	2,01	16,98
42			10,11			14,52
43	13,36	4,76				
44	48,36		7,79			
45	86,75		7,50			
46	95,07		8,33	17,93	1,56	15,86
47		49,76	5,96			
48		87,29	7,58	19,17	1,80	14,03
49	61,11	62,10				
50	57,75	60,76				
51	59,72	58,45				
52	57,45	58,03				
53	58,17	60,76				
54		86,50	8,21	21,10	2,35	11,73
55		71,07	6,06	19,09	1,96	13,35

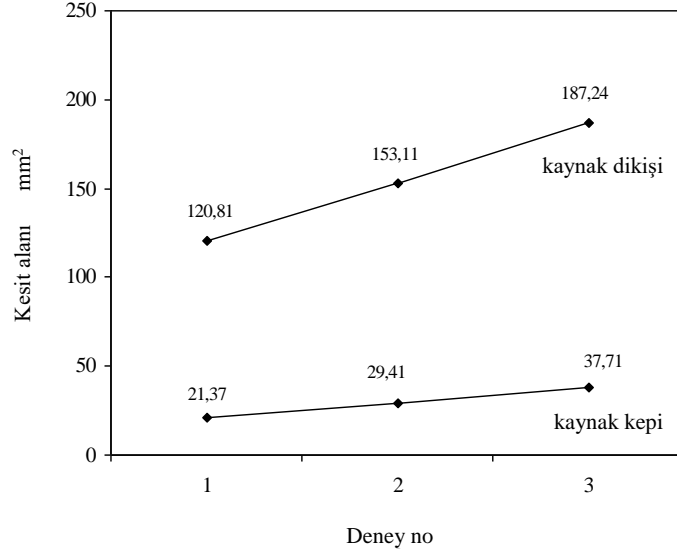
Deney 1, 2 ve 3 incelendiğinde, tüm diğer parametrelerin sabit kalması halinde, kaynak hızının azalması ile kaynak dikiş kesitinin arttığı yani diğer bir deyişle, kaynak banyosunun büyüdüğü görülmektedir (Şekil 4.19 ve 4.21). Yine benzer şekilde, kaynak hızının azalması yani ısı girdisinin artması ile kaynak dikişi nüfuziyet derinliğinin, genişliğinin ve yüksekliğinin de arttığı görülmektedir (Şekil 4.20 ve 4.22).



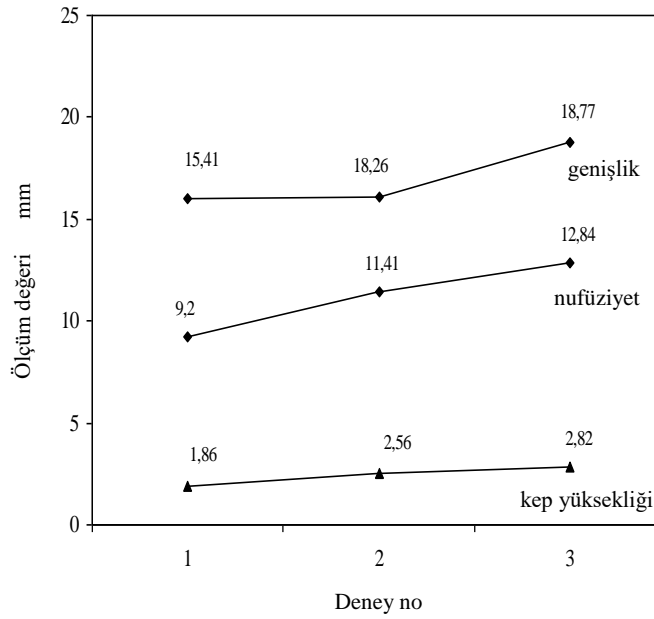
Şekil 4.19. İç kaynak dikişi ve kaynak kepi kesitinin değişimi (1016x17,7 mm)



Şekil 4.20. İç kaynak dikişi geometrik büyüklüklerinin değişimi (1016x17,7 mm)



Şekil 4.21. Dış kaynak dikişi ve kaynak kepi kesitinin değişimi (1016x17,7 mm)



Şekil 4.22. Dış kaynak dikişi geometrik büyüklüklerinin değişimi (1016x17,7mm)

Isı girdilerinin birbirine çok yakın olduğu, 4 no'lu kaynak dikişi (2500 J/mm) ile 8 no'lu kaynak dikişinin (2340 J/mm) geometrik ölçüler açısından da birbirine çok yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Kaynak dikiş kesit alanları; 4 no'lu kaynak dikişinde 145,52 mm² iken 8 no'lu deney parçasında 142,40 mm², nufüziyet derinlikleri ise sırasıyla 11,79 mm ile 12,19 mm 'dir. Buradan da görülmektedir ki, ısı girdisinin aynı olmasına karşın farklı kaynak hızları ve buna bağlı olarak da farklı kafa sayıları ile kaynak yapmak olasıdır. 914x11,1 mm ebatlı

boruda, iç kaynakta üç kafanın kullanıldığı Deney 4 'de, iç kaynağa uygulanan ısı girdisi 1571 J/mm ve elde edilen dikişin kesit alanı 91,42 mm² 'dir. Deney 5 'de ise iç kaynakta iki kafa kullanılmıştır. Burada, uygulanan ısı girdisi 1404 J/mm ve elde edilen dikişinin kesit alanı 83,73 mm² 'dir. İki kafa kullanımında, elde edilen dikişin kesit alanının ilkine kıyasla biraz daha küçük olmasına karşın, elde edilen her iki dikişte gaz borusundan istenen kalite özelliklerini sağlayacak durumdadır. Ancak, iki kafa kullanımında, arzu edilen dikiş geometrisinin elde edilebilmesi için kaynak akım şiddeti DC kafada 1000 A değerine yükseltilmiştir. AC kafada ise, yine 3,2 mm tel çapı için yüksek sayılabilecek 775 A değeri ile çalışılmıştır. Bu nedenle, tel çapına ve malzeme kalınlığına bağlı olarak çalışılabilecek maksimum akım şiddeti değerlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Benzer durum, 1067x14,27 mm ebatlı boruda farklı kaynak hızları, farklı elektriksel kaynak parametreleri ve farklı kafa sayıları ile yapılan deneysel çalışmalarda da açık bir şekilde görülmüştür. Deney 6, 7 ve 8 'de elde edilen kaynak dikişlerine ait toplu görünüm Şekil 4.13 'de verilmiştir. Her üç durumda da elde edilen kaynak dikişleri, gaz ve petrol hat boruları için API 5L standardının öngördüğü bütün koşulları yerine getirecek kalite düzeyindedir. Ancak, burada 1,65 m/dk ile 1,40 m/dk kaynak hızları arasında %18 gibi oldukça yüksek bir fark vardır. Bu hız farkı ise endüstriyel uygulamalar için büyük bir önem taşımaktadır.

1422x12.5 mm ebatlı boruda ise 900 A gibi yüksek akım şiddetlerine çıkılarak, gaz borusu için oldukça yüksek bir hız sayılabilecek olan 2.30 m/dk değerine ulaşılmıştır. 914x11,1 mm ebatlı boru denemelerinde 2,20 m/dk kaynak hızı ve iç kaynakta üç kafa kullanımı ile elde edilen dikişin kesit alanı 91,42 mm² idi. Bu deneyde kullanılan malzemenin kalınlığı daha fazla olmasına karşın, 2,30 m/dk değerine çıkılmış ve elde edilen kaynak dikişinin kesit alanı 95,07 mm² olmuştur. Bu sonuçlar ise, malzeme kalınlığı ile kaynak dikiş geometrisi arasındaki ilişkinin önemini göstermektedir. 1067x10,31 mm ebatlı boruda ise aynı parametrelerle üretilen bir borunun beş farklı noktasından alınan parçalar yardımıyla kaynak dikiş geometrisinde ki değişim incelenmiştir. Numuneler arasında iç dikiş kesit alanının 57,45 mm² ile 61,11 mm², dış dikiş kesitinin ise 58,03 mm² ile 62,10 mm² arasında değiştiği saptanmıştır. Elde edilen bu verilerin ışığı altında, sürekli üretim

durumunda, tüm parametrelerin aynı kalmasına karşın ergime kesit alanında yaklaşık %6 dolaylarında bir değişim olduğu söylenebilir. Söz konusu bu sapmaya, kaynak ağzı biçimindeki değişimler, kaynak hızı, kaynak akımı ve ark gerilimindeki küçük değişimlerin yol açtığı düşünülmektedir.

1016x8,8 mm ebatlı boruda, dış kaynaktaki ısı girdisi yaklaşık 1087 J/mm olacak şekilde, iki farklı kaynak hızında (1.65 m/dk ve 2.60 m/dk) çalışılmıştır. Isı girdisinin aynı olmasına karşın, kaynak hızının azalması ile birlikte ergimeye iştirak eden esas metal miktarı artığı için kaynak dikiş kesit alanının diğerine kıyasla yaklaşık %22 oranında büyüdüğü görülmektedir. 1,65 m/dk 'lık kaynak hızında kaynak dikiş kesit alanı 86,50 mm² iken, bu değer 2,60 m/dk kaynak hızında 71,07 mm² 'dir. Ayrıca, akım seviyelerinin farklı olması nedeni ile dolgu metali ile esas metalin karışım oranları da farklıdır. Karışım oranı, 1,65 m/dk kaynak hızında %24,39 iken 2,60 m/dk kaynak hızında %26,86 'dır. Doğal olarak, karışım oranındaki bu farklılık, kaynak metalinin kimyasal bileşiminde de bazı farklılıkların oluşmasına neden olacaktır. Deney 12 'den de ise iç kaynak noktasının yerinin değişimi ile kaynak dikişinin genişliğinin ve nufuziyet derinliğinin de değiştiği görülmektedir. Ayrıca, kaynak banyosuna iletilen toplam akım miktarının DC ve AC kafalarda ki dağılımı ile her bir kafadaki akım şiddeti seviyesi oldukça önemlidir. Deney 13 'den de görüldüğü gibi, toplam akım miktarının aynı olmasına karşın, akımın DC ve AC kafalardaki dağılımına göre ergiyen tel miktarı ve dolayısıyla dikiş geometrisi değişmektedir. Su ve kazık boruları gibi kaynak dikişinde X-Ray kontrolünün gerekli olmadığı borularda, 3.00 m/dk gibi yüksek kaynak hızlarına çıkılabileceği görülmüştür (Deney 14).

Tüm bunlar, iyi bir kaynak dikişinin elde edilebilmesi ve yüksek kaynak hızlarına çıkılması için, kaynak hızı, iletilen toplam akım miktarı, kullanılan kafa sayısı, her bir kafaya yüklenen akım miktarı ve akımın DC ve AC kafalardaki dağılımı arasında uygun bir dengenin kurulması gerektiğini göstermektedir. Söz konusu bu dengenin kurulabilmesi için öncelikle malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilecek olan dikiş geometrisinin öngörülebilmesi ve parametrelere bağlı olarak kaynak noktasına sevk edilecek olan tel miktarının belirlenebilmesi gereklidir.

4.1.1. Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde tel yığma miktarının belirlenmesi

Yapılan teorik çalışmada, tel ergime miktarı ile ilgili olarak dört farklı kaynağa ait bilgiler bulunmuştur (bkz. Bölüm 2.2.3.1). Bunlardan, Lincoln Electric ve Metals Handbook 'a göre elde edilen değerlerin sadece DC(+) akım türü için geçerli olduğu ve bu nedenle spiral dikişli boru üretiminde yapılacak olan tel ergime hesaplamalarına yardımcı olamayacağı belirtilmişti. Chandel ve Tusek tarafından ayrı ayrı geliştirilen formüller ise Denklem 2.1 ile 2.4 'de verilmiş olup, burada, MR tel ergime miktarını (kg/h), I kaynak akımını (A), L telin serbest uç uzunluğunu (mm), d ise tel çapını (mm) ifade etmektedir. Genel olarak, aynı koşullar altında Chandel tarafından geliştirilen formüllerle Tusek formüllerine kıyasla daha fazla tel ergime miktarlarına ulaşıldığı görülmektedir (Şekil 4.23).

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

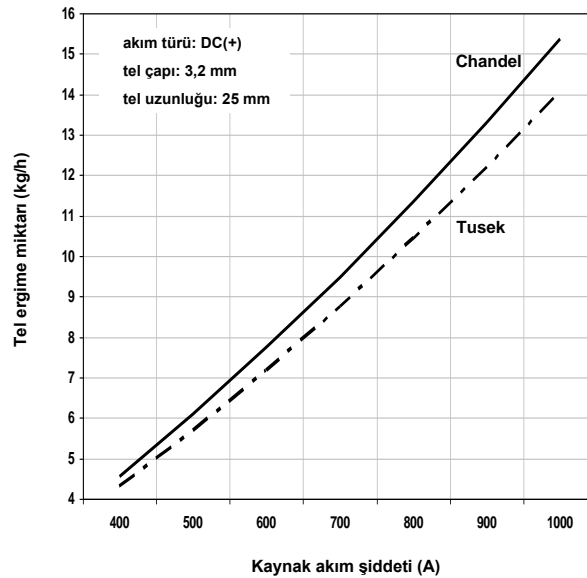
$$MR_{DC(+)} = 0.010371 \cdot I + (2,2426 \times 10^{-6} \cdot I^2 \cdot L)/d^2 - 0,462 \quad (2.1)$$

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

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

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

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



Şekil 4.23. Chandel ve Tusek 'ın tel ergime formüllerinin karşılaştırılması.

Deneysel çalışmaların bu aşamasında, Chandel ve Tusek tarafından geliştirilmiş olan formüllerin tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretimi için kullanılabilirliği incelenmiştir. Toplam dolgu alanının hesaplanması ve doğrudan hız ölçümü olmak üzere iki farklı yöntemle yürütülen bu çalışmada, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen tel yığılma miktarları, Chandel ve Tusek tarafından geliştirilmiş olan formüllerden elde edilen değerlerle kıyaslanarak söz konusu bu formüllerin uygunluğu araştırılmıştır.

4.1.1.1. Dolgu alanının hesaplanması ile tel yığılma miktarının belirlenmesi

Önceden yapılmış olan deneysel çalışmalarda elde edilen tüm kaynak bağlantıları, metalografik incelemeye tabi tutularak önce toplam dolgu alanı ve daha sonra her bir dikiş için birim zamanda ergiyen toplam tel miktarı hesaplanmıştır. Yığılan tel miktarının hesaplanmasında öncelikle toplam dolgu kesit alanı hesaplanmıştır. Şekil 4.24 'de gösterildiği üzere, kaynak ağzı kesiti ile kaynak kepi kesit alanının toplamı toplam dolgu kesit alanını vermektedir (Denklem 4.1). Kullanılan telin yoğunluğu ($7,70 \text{ kg/dm}^3$) ve kaynak hızının dikkate alınması ile birim zamanda yığılan tel miktarı Denklem 4.2 yardımı ile hesaplanabilir. Denklem 4.2 'de gerekli birim dönüşümleri yapılırsa, bir saat içinde kaynak bölgesine yığılan tel miktarını (E) kolaylıkla hesaplama olanağı vardır (Denklem 4.3). Burada, A_1 kaynak ağzı kesit alanını (mm^2), A_2 kaynak kepi kesit alanını (mm^2), A_d toplam dolgu kesit alanını (mm^2) ve v ise kaynak hızını (m/dk) ifade etmektedir.

$$A_d = A_1 + A_2 \quad (4.1)$$

$$E = A_d \cdot \rho \cdot v \quad (4.2)$$

$$E = 0,462 \cdot A_d \cdot v \quad (4.3)$$

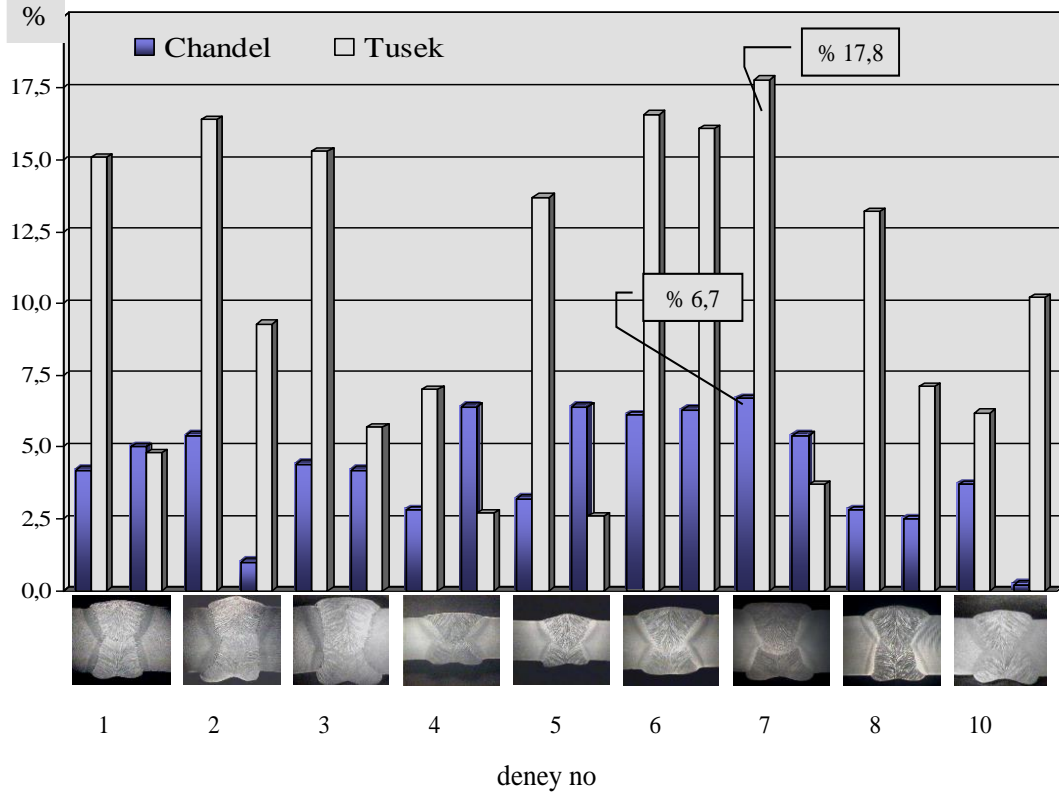


Şekil 4.24. Kaynak ağzı ve kaynak kepi kesitinin şematik gösterimi.

Toplam dolgu alanı hesaplandıktan sonra, kaynak hızının da dikkate alınması ile Denklem 4.3 yardımı ile yığılan toplam tel miktarı hesaplanmıştır. Aynı zamanda, her bir deneysel çalışmaya ait elektriksel parametrelerde göz önüne alınarak, 26 mm serbest tel uzunluğu için Chandel ve Tusek 'e göre teorik tel ergime miktarları hesaplanmıştır. Son adımda ise, toplam dolgu alanına göre hesaplanan değerlerle teorik olarak elde edilen değerler birbirleri ile kıyaslanarak, söz konusu bu teorik formüllerin uygunluğu araştırılmıştır (Tablo 4.16).

Tablo 4.16. Tel ergime miktarının teorik ergime miktarı ile karşılaştırılması.

Deney parça no	Dolgu alanı (mm ²)	Kaynak kepi kesit alanı (mm ²)	Dikiş kesit alanı (mm ²)	Ergime miktarı (kg/h)	Ergime miktarı (Chandel) (kg/h)	%	Ergime miktarı (Tusek) (kg/h)	%
4	48,22	23,51	145,52	40,10	38,47	4,2	34,84	15,1
6	31,85	21,37	120,81	26,49	27,90	5,0	25,28	4,8
9	58,53	33,82	169,76	40,56	38,47	5,4	34,84	16,4
11	39,89	29,41	153,11	27,64	27,90	1,0	25,28	9,3
14	72,46	47,75	195,63	40,17	38,47	4,4	34,84	15,3
16	48,19	37,71	187,24	26,72	27,90	4,2	25,28	5,7
20	28,20	16,15	91,42	28,66	29,48	2,8	26,79	7,0
22	19,22	15,36	79,01	19,54	20,88	6,4	19,02	2,7
24	27,00	14,95	83,73	27,44	26,59	3,2	24,14	13,7
26	19,15	15,29	86,58	19,46	20,79	6,4	18,96	2,6
30	42,03	14,61	123,23	29,13	27,45	6,1	24,98	16,6
32	32,16	26,00	117,69	22,29	20,97	6,3	19,20	16,1
35	48,19	20,77	108,96	36,74	34,42	6,7	31,20	17,8
37	24,27	18,11	101,02	18,50	19,56	5,4	17,84	3,7
39	40,48	13,06	115,25	26,18	25,47	2,8	23,13	13,2
41	31,54	25,38	103,28	20,40	20,92	2,5	19,05	7,1
46	31,29	17,93	95,07	33,25	34,53	3,7	31,31	6,2
48	23,93	19,17	87,29	25,43	25,41	-	23,07	10,2
54		21,10	86,50	16,08	15,60	3,1	14,27	12,7
55		19,09	71,07	22,93	24,30	5,6	22,12	3,7



Şekil 4.25. Chandel ve Tusek formülleri ile elde edilen tel ergime miktarlarının toplam dolgu alanına göre hesaplanmış olan değerlerle karşılaştırılması.

Tablo 4.16 incelendiğinde, Chandel ve Tusek formülleri ile elde edilen birim zamanda ki tel ergime miktarları ile toplam dolgu alanına göre hesaplanmış olan tel ergime miktarları arasında bazı sapmaların olduğu görülmektedir. Bu sapma, Tusek formüllerinde %17,8 'e kadar çıkarken Chandel 'ın formüllerinde maksimum % 6,7 'de kalmıştır (Şekil 4.25). Buradan da görülmektedir ki, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde tel ergime miktarlarının belirlenmesi amacı ile Chandel tarafından geliştirilmiş olan formüllerin kullanımı olanaklıdır.

4.1.1.2. Tel ilerleme hızlarının ölçümü ile tel yığıma miktarının belirlenmesi

Akım şiddeti ile tel ilerleme hızı arasındaki ilişkinin ortaya çıkarılması için, metalografik incelemenin yanı sıra, doğrudan tel ilerleme hızları da ölçülmüştür. Bu amaçla, üç farklı üretimde tel ilerleme hızları ölçülerek kayıt altına alınmıştır (Deney 15, 16 ve 17). Ölçüm sonuçları Tablo 4.18, 4.20 ve 4.22 'de verilmiştir.

Tablo 4.17. Deney 15 'e ait parametreler

Akım türü	İç Kaynak			Dış Kaynak		
	Akım şiddeti (A)	Serbest tel uzunluğu (mm)	Tel çapı (mm)	Akım şiddeti (A)	Serbest tel uzunluğu (mm)	Tel çapı (mm)
DC (+)	550	26	3,2	550	26	4,0

Tablo 4.18. Deney 15 'e ait tel ilerleme hız değerleri (m/dk).

İç kaynak				Dış kaynak			
Ölçüm no	Ölçüm değeri (m/dk)	Ölçüm no	Ölçüm değeri (m/dk)	Ölçüm no	Ölçüm değeri (m/dk)	Ölçüm no	Ölçüm değeri (m/dk)
1	1,79	21	1,79	1	1,05	21	1,08
2	1,79	22	1,76	2	1,07	22	1,02
3	1,80	23	1,79	3	1,04	23	1,11
4	1,80	24	1,81	4	1,01	24	1,02
5	1,77	25	1,79	5	1,01	25	1,05
6	1,78	26	1,78	6	1,08	26	1,07
7	1,78	27	1,79	7	1,00	27	1,08
8	1,78	28	1,79	8	1,06	28	1,01
9	1,78	29	1,79	9	1,04	29	1,10
10	1,78	30	1,80	10	1,07	30	1,02
11	1,77	31	1,78	11	1,03	31	1,06
12	1,77	32	1,78	12	1,04	32	1,09
13	1,81	33	1,79	13	1,08	33	1,07
14	1,78	34	1,79	14	1,04	34	1,05
15	1,75	35	1,78	15	1,03	35	1,02
16	1,80	36	1,80	16	1,05	36	1,04
17	1,80	37	1,78	17	1,06	37	1,05
18	1,78	38	1,79	18	1,03	38	1,02
19	1,79	39	1,77	19	1,05	39	1,05
20	1,76	40	1,77	20	1,06	40	1,09

Tablo 4.19. Deney 16 ‘ya ait parametreler

Akım türü	İç Kaynak			Dış Kaynak		
	Akım şiddeti (A)	Serbest tel uzunluğu (mm)	Tel çapı (mm)	Akım şiddeti (A)	Serbest tel uzunluğu (mm)	Tel çapı (mm)
DC(+)	800	25	3,2	775	24	4,0
1. AC	675	26	3,2	700	25	3,2
2. AC	450	26	3,2			

Tablo 4.20. Deney 16 ‘ya ait tel ilerleme hız değerleri (m/dk).

Ölçüm no	Ölçüm değeri (m/dk)				
	İç kaynak DC(+)	İç kaynak 1.AC	İç kaynak 2.AC	Dış kaynak DC(+)	Dış kaynak AC
1	2,88	2,63	1,75	1,66	3,24
2	2,84	2,72	1,80	1,68	3,20
3	2,87	2,87	1,78	1,67	3,21
4	2,85	2,67	1,74	1,67	3,23
5	2,86	2,82	1,79	1,65	3,21
6	2,87	2,64	1,76	1,69	3,19
7	2,96	2,77	1,74	1,66	3,16
8	2,80	2,71	1,78	1,66	3,17
9	2,84	2,65	1,70	1,64	3,14
10	2,78	2,68	1,71	1,68	3,21
11	2,91	2,76	1,77	1,67	3,23
12	2,83	2,84	1,72	1,67	3,14
13	2,86	2,75	1,77	1,65	3,16
14	2,86	2,67	1,80	1,66	3,19
15	2,91	2,87	1,75	1,67	3,30
16	2,86	2,62	1,78	1,67	3,23
17	2,87	2,91	1,76	1,64	3,18
18	2,90	2,71	1,79	1,67	3,19
19	2,90	2,87	1,77	1,67	3,18
20	2,90	2,91	1,76	1,65	3,17

Tablo 4.21. Deney 17 'ye ait parametreler.

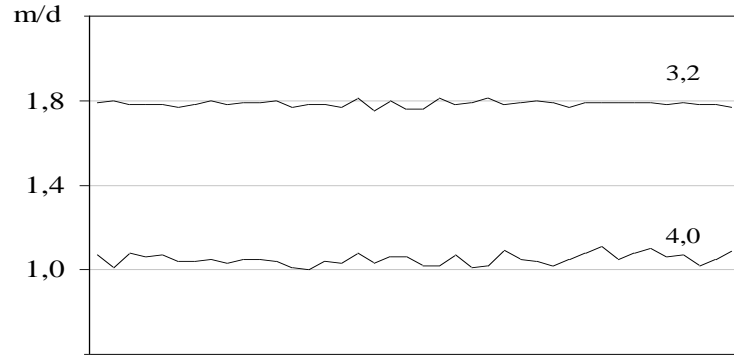
Akım türü	İç Kaynak			Dış Kaynak		
	Akım şiddeti (A)	Serbest tel uzunluğu (mm)	Tel çapı (mm)	Akım şiddeti (A)	Serbest tel uzunluğu (mm)	Tel çapı (mm)
DC(+)	600	26	3,2	750	26	4,0
1. AC	500	28	3,2			

Tablo 4.22. Deney 17 'ye ait tel ilerleme hız değerleri (m/dk).

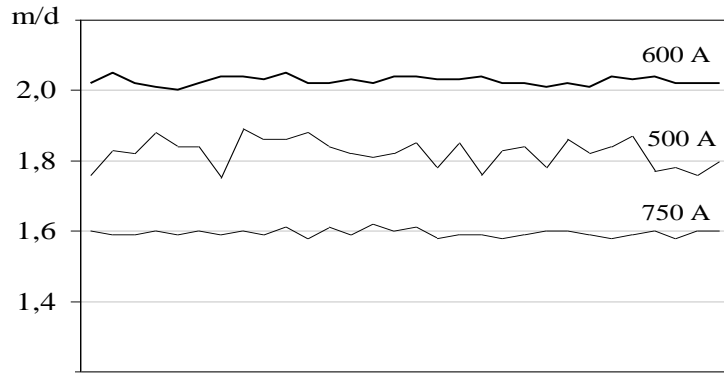
Ölçüm no	Ölçüm sonuçları (m/dk)		
	İç kaynak DC(+)	İç kaynak AC	Dış kaynak DC
1	2,02	1,88	1,58
2	2,02	1,84	1,61
3	2,03	1,82	1,59
4	2,02	1,81	1,62
5	2,04	1,82	1,60
6	2,04	1,85	1,61
7	2,03	1,78	1,58
8	2,03	1,85	1,59
9	2,04	1,76	1,59
10	2,02	1,83	1,58
11	2,01	1,83	1,60
12	2,03	1,85	1,60
13	2,05	1,84	1,58
14	2,00	1,83	1,58
15	1,99	1,81	1,59
16	2,04	1,84	1,59
17	2,04	1,82	1,58
18	2,05	1,82	1,58
19	2,04	1,79	1,61
20	2,01	1,76	1,60
21	2,00	1,83	1,59
22	2,02	1,82	1,59
23	2,04	1,88	1,60
24	2,04	1,84	1,59
25	2,03	1,84	1,60
26	2,05	1,75	1,59

Tablo 4.22 (Devam). Deneý 17 'ye ait tel ilerleme hız deęerleri (m/dk).

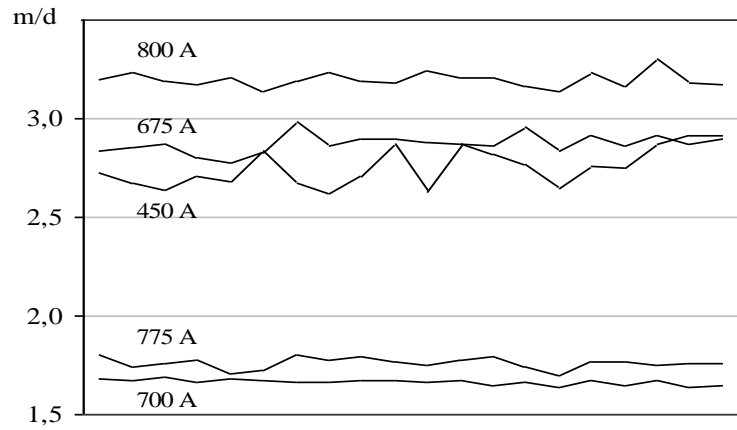
Ölçüm no	Ölçüm sonuçları (m/dk)		
	İç kaynak DC(+)	İç kaynak AC	Dış kaynak DC
27	2,02	1,89	1,60
28	2,02	1,86	1,59
29	2,05	1,86	1,61
30	2,03	1,82	1,60
31	2,02	1,84	1,59
32	2,01	1,78	1,60
33	2,02	1,86	1,60
34	2,01	1,82	1,59
35	2,04	1,84	1,58
36	2,03	1,87	1,59
37	2,04	1,77	1,60
38	2,02	1,78	1,58
39	2,04	1,76	1,60
40	2,02	1,80	1,60
41	2,02	1,83	1,60
42	2,03	1,86	1,58
43	2,02	1,84	1,58
44	2,00	1,85	1,60
45	2,04	1,76	1,60
46	2,00	1,83	1,60
47	2,04	1,80	1,59
48	2,04	1,83	1,60
49	2,01	1,80	1,60
50	2,00	1,85	1,60
51	2,00	1,84	1,59
52	2,03	1,85	1,59
53	2,00	1,80	1,59
54	2,02	1,83	1,59
55	2,02	1,83	1,61
56	2,02	1,82	1,61
57	2,03	1,85	1,60
58	2,02	1,84	1,58
59	2,04	1,80	1,59
60	2,02	1,82	1,60



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.26. a) Deney 15 'e ait tel ilerleme hız ölçüm sonuçlarının gösterimi
 b) Deney 16 'ya ait tel ilerleme hız ölçüm sonuçlarının gösterimi
 c) Deney 17 'ye ait tel ilerleme hız ölçüm sonuçlarının gösterimi

Görüldüğü gibi, Tablo 4.18, 4.20 ve 4.22 'de verilen tel ilerleme hız değerleri m/dk cinsindedir. Bu değerleri, Chandel ve Tusek tarafından geliştirilmiş olan formül değerleri ile karşılaştırabilmek için, tel ilerleme hız değerlerinin birim zamanda ergiyen tel miktarına (kg/h) dönüştürülmesi gereklidir.

$$MR_{3,2} = 3,716 \cdot V \quad (4.4)$$

$$MR_{4,0} = 5,802 \cdot V \quad (4.5)$$

Bu nedenle, tel hızı, tel kesiti ve tel yoğunluğunun göz önüne alınması ile elde edilen formüller yardımı ile birim zamanda ergiyen tel miktarı hesaplanmıştır (Denklem 4.4 ve 4.5). Burada $MR_{3,2}$ ve $MR_{4,0}$ sırasıyla, 3,2 mm ve 4,0 mm çaplı teller için ergime miktarını (kg/h), V ise tel ilerleme hızını (m/dk) ifade etmektedir. Son aşamada ise, bu şekilde elde edilen tel ergime miktarları teorik ergime miktarları ile karşılaştırılmış ve aradaki fark incelenmiştir (Tablo 4.23). Tablo 4.23 'den de görüldüğü gibi Chandel 'ın formülleri ile elde edilen teorik tel ergime miktarları, gerçek ölçüm değerlerine daha yakındır. Teorik tel ergime değerleri ile ölçülen değerler arasındaki farklılık, Tusek formüllerinde %16,7 iken, bu fark Chandel 'ın formüllerinde %8,0 'e kadar düşmektedir. %8,0 oranındaki bu sapma ise üretim öncesi yapılacak olan kaynak tasarım çalışmalarında problem yaratmayacak düzeydedir. Sonuç olarak, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde kaynak parametrelerine bağlı olarak tel ilerleme hızını Chandel tarafından geliştirilen formüller yardımı ile hesaplanabileceği söylenebilir.

Tablo 4.23. Tel hızı ölçüm değerleri ile teorik ergime miktarının karşılaştırılması.

Akım türü	Akım şiddeti	Tel çapı	Tel uzunluğu	Tel hızı	Ergime miktarı	Ergime miktarı (Chandel)		Ergime miktarı (Tusek)	
	A	mm	mm	m/d	kg/h	kg/h	%	kg/h	%
DC	600	3,2	26	2,03	7,54	7,81	3,5	7,24	4,1
AC	500	3,2	28	1,82	6,76	6,26	8,0	5,84	15,8
DC	750	4,0	26	1,59	9,23	9,37	1,5	8,65	6,7
DC	550	3,2	26	1,78	6,61	6,96	5,0	6,48	2,0
DC	550	4,0	26	1,05	6,10	6,34	3,8	5,92	3,0
DC	800	3,2	25	2,88	10,70	11,34	5,6	10,43	2,6
AC	675	3,2	26	2,75	10,23	10,91	6,0	9,82	4,2
AC	450	3,2	26	1,76	6,54	6,53	0,0	5,93	10,3
DC	775	4,0	24	1,66	9,64	9,60	0,4	8,85	8,9
AC	700	3,2	25	3,20	11,89	11,33	4,9	10,19	16,7

4.1.2. Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde kaynak dikiş geometrisinin belirlenmesi

Kaynak kep biçiminin bir daire parçası olarak düşünülmesi halinde, malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak dikişine ait bazı temel geometrik büyüklükler önceden kolaylıkla hesaplanabilir. Daire parçasına ait temel formüller Denklem 4.6 ve 4.7 'de verilmiştir. Burada, h daire parçasının yüksekliğini, s genişliğini ve r ise daire parçasının yarıçapını ifade etmektedir. A_d ise söz konusu bu daire parçasının kesit alanını vermektedir (Şekil 4.27). Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, dikiş yüksekliği Denklem 4.8 'e göre hesaplanır ve Denklem 4.9 'da ki gibi bir kabul yapılırsa oldukça ideal sonuçlar elde edilmektedir. A_e ise kaynak kepinin ideal bir daire parçası olmayıp eliptik bir biçime sahip olması durumunda ki kesit alanını vermektedir.

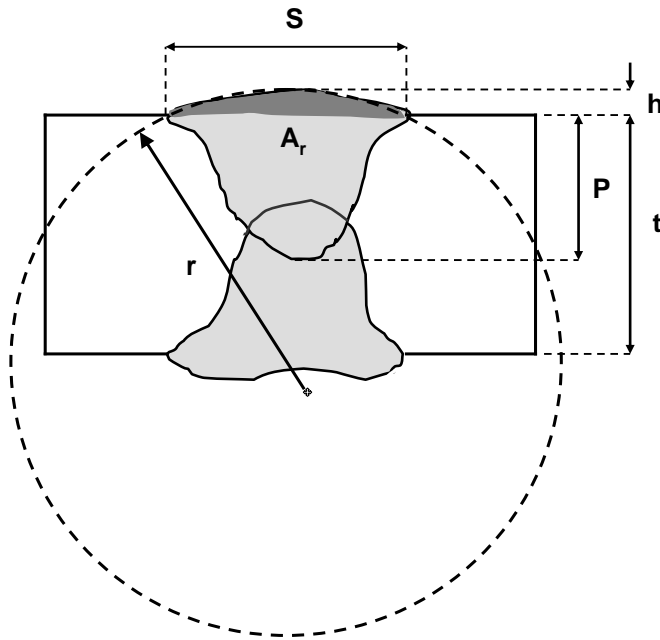
$$A_d = (h / 6s) \cdot (3 h^2 + 4 s^2) \quad (4.6)$$

$$r = (h / 2) + (s^2 / 8h) \quad (4.7)$$

$$h = 1 + (0,05 \cdot t) \quad (4.8)$$

$$r = 1,30 \cdot t \quad (4.9)$$

$$A_e = (S \cdot h \cdot \pi) / 2 \quad (4.10)$$



Şekil 4.27. Daire parçası ve kaynak dikiş kepi.

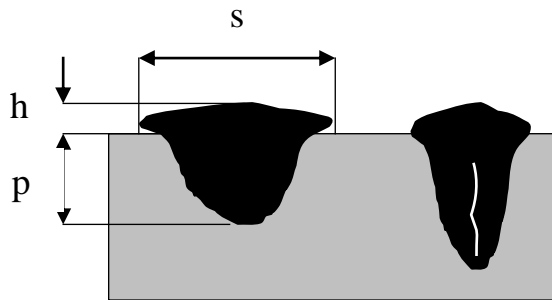
4.1.2.1. Kaynak dikişinin geometrik büyüklüklerinin hesaplanması

Denklem 4.7, 4.8 ve 4.9 'da verilen formüllerin kullanımı ile elde edilen malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak dikişinin geometrik büyüklükleri (dikiş yüksekliği, genişliği ve nüfuziyet derinliği) Tablo 4.24 'de verilmiştir.

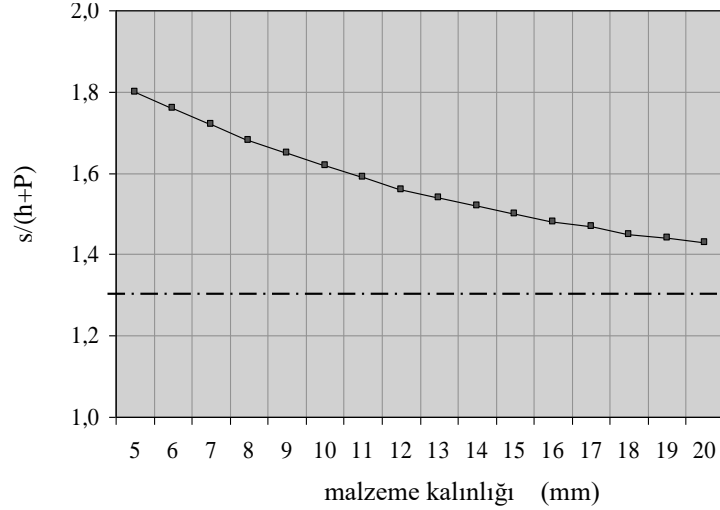
Kaynak dikişinin genişlik/derinlik oranı ile sıcak çatlak oluşumu arasında doğrudan bir ilişki vardır. Genişlik/derinlik oranı küçük olan yani, dar ve sivri bir biçime sahip kaynak dikişinde soğuma düzensizliklerinin oluşması kaçınılmazdır. Buna bağlı olarak, kaynak metalinin katılaşıma sırasındaki büzülmesi (kendini çekme) çok hızlı gerçekleşecek ve bu da çatlak oluşumuna yol açacaktır (Şekil 4.28). The Welding Institute, genişlik/derinlik oranının 1,8 'den küçük olması halinde, çatlak oluşum tehlikesinin artacağını belirtmektedir (Linnert 1994). Buna karşın, Lincoln Electric, söz konusu bu oranın 0,5 'den küçük olması durumunda çatlak tehlikesinin çok yüksek olacağını, 1,3 'den büyük olması halinde ise çatlak tehlikesinin azalacağını bildirmektedir (Lincoln Electric 2000).

Tablo 4.24. Malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak dikiş geometrisi.

	Malzeme kalınlığı (mm)							
	6	8	10	12	14	16	18	20
h	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00
S	8,62	10,42	12,12	13,76	15,36	16,93	18,47	20,00
P	3,60	4,80	6,00	7,20	8,40	9,60	10,80	12,00



Şekil 4.28. Kaynak dikişi genişlik/derinlik oranı ile çatlak arasındaki ilişki.



Şekil 4.29. Genişlik/derinlik oranının malzeme kalınlığına bağlı olarak değişimi.

Tablo 4.24 'de ki değerlere bağlı olarak kaynak dikişinin genişlik/derinlik oranının malzeme kalınlığına göre değişimi Şekil 4.29 'de verilmiştir. Genişlik/derinlik oranının malzeme kalınlığının artması ile birlikte azaldığı görülmektedir. Ancak, 20 mm gibi et kalınlıkların da dahi genişlik/derinlik oranının Lincoln Electric tarafından verilen 1,3 'lük sınır değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle, kaynak dikişi genişlik/derinlik oranının sıcak çatlak oluşumu açısından güvenli bölgede olduğu görülmektedir.

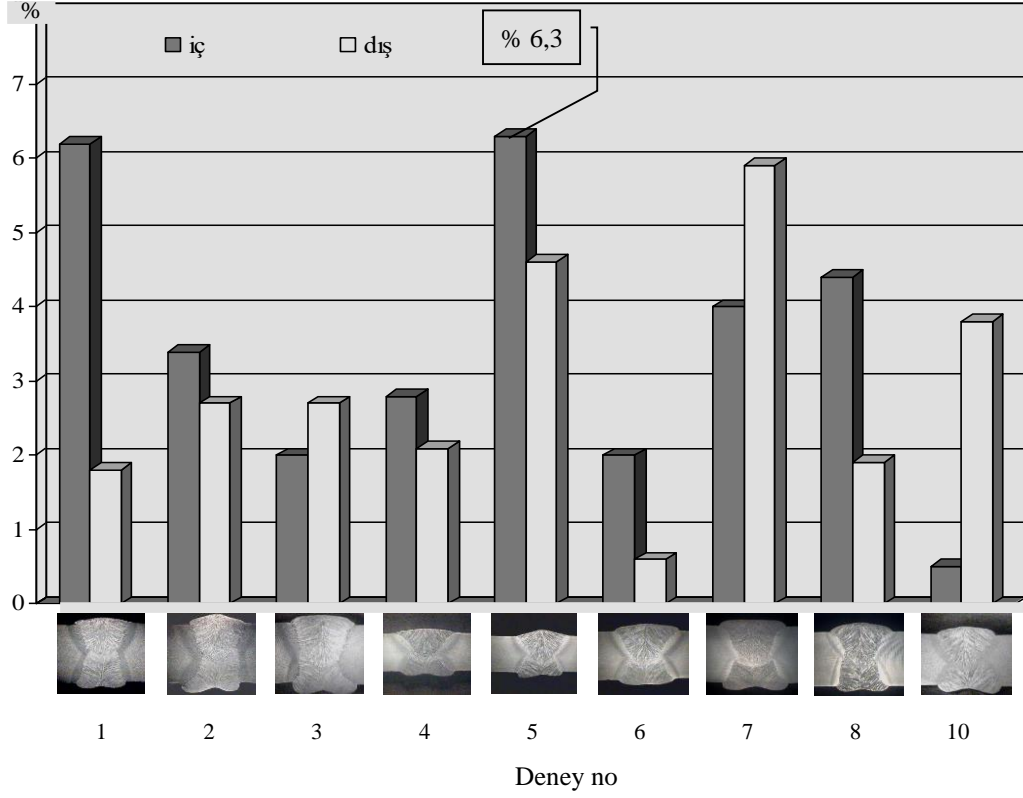
4.1.2.2. Kaynak dikişi kep alanının hesaplanması

Kaynak dikiş kepini alanını, daire parçasının alanını veren Denklem 4.6 ile hesaplamak olasıdır. Ancak, pratik uygulamada elde edilen kaynak kepi hiçbir zaman ideal bir daire parçası gibi olmayıp eliptik bir şekle sahiptir. Elipsin alanı ise Denklem 4.10 yardımı ile hesaplanmaktadır. Kaynak kepini kesit alanını hesaplayabilmek için, önceden yapılmış olan deneysel çalışmalardan da faydalanılmıştır. Buna göre, öncelikle Tablo 4.15 'de verilen kaynak dikişi genişlik ve yükseklik değerlerine göre Denklem 4.6 ve Denklem 4.10 yardımı ile her bir kaynak dikişinin teorik kep alanı hesaplanmıştır. Burada ki, teorik hesaplama öncelikle sadece daire parçası alanı, daha sonra sadece elips alanı ve son olarak da karma alan (hem daire parçası hem de elips alanlarının aritmetik ortalaması) olacak şekilde yapılmıştır (Tablo 4.25). Kaynak kep alanının

belirlenmesine yönelik olarak elde edilen teorik değerler, daha sonra Tablo 4.15 'de verilen gerçek ölçüm değerleri ile kıyaslanmıştır. Yapılan hesaplamalar göstermiştir ki, daire parçasına göre hesap yapıldığında gerçek değerinin altında, elipse göre hesap yapıldığında ise gerçek değer üstünde değerler elde edilmektedir. Her iki hesaplamanın aritmetik ortalaması alınınca gerçek değerlere yakın sonuçlar (maksimum sapma %6.3) elde edilmiştir (Şekil 4.30).

Tablo 4.25. Kaynak kepi alanının hesaplanmasına ait değerler.

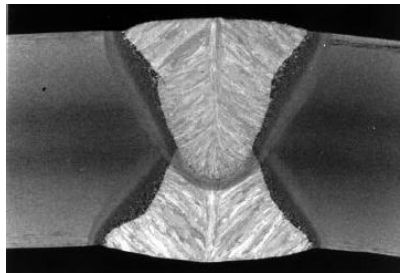
Deney parça no	A _k (mm ²)	h (mm)	B (mm)	Daire parçası alanı (mm ²)	%	Elips alanı (mm ²)	%	Karma alan (mm ²)	%
4	23,51	1,96	15,41	20,38	86,7	23,72	100,9	22,05	93,8
6	21,37	1,86	16,04	20,09	94,0	23,43	109,6	21,76	101,8
9	33,82	2,45	18,26	30,23	89,4	35,14	103,9	32,68	96,6
11	29,41	2,56	16,11	28,02	95,3	32,39	110,1	30,20	102,7
14	47,75	3,24	19,71	43,44	91,0	50,16	105,0	46,80	98,0
16	37,71	2,82	18,77	35,88	95,2	41,57	110,2	38,73	102,7
20	16,15	1,40	15,40	14,46	89,6	16,93	104,8	15,70	97,2
22	15,36	1,27	16,97	14,43	93,9	16,93	110,2	15,68	102,1
24	14,95	1,37	14,03	12,91	86,3	15,10	101,0	14,00	93,7
26	15,29	1,49	13,43	13,46	88,1	15,72	102,8	14,59	95,4
30	14,61	1,27	15,49	13,18	90,2	15,45	105,8	14,32	98,0
32	26,00	1,99	17,82	23,86	91,8	27,85	107,1	25,86	99,4
35	20,77	1,76	16,84	19,92	95,9	23,28	112,1	21,60	104,0
37	18,11	1,54	15,19	15,72	86,8	18,37	101,4	17,04	94,1
39	13,06	1,36	12,59	11,51	88,2	13,45	103,0	12,48	95,6
41	25,38	2,01	16,98	22,29	90,6	26,81	105,6	24,90	98,1
46	17,93	1,56	15,86	16,61	92,7	19,43	108,4	18,02	100,5
48	19,17	1,80	14,03	17,04	88,9	19,83	103,5	18,44	96,2
54	21,10	2,35	11,73	18,93	89,7	21,65	102,6	20,29	96,2
55	19,09	1,96	13,35	17,73	92,9	20,55	107,7	19,14	100,3



Şekil 4.30. Kaynak kep alanının teorik hesaplama değerleri ile gerçek ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.

4.1.3. Boyuna dikişli doğal gaz borularının incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, Europipe-Germany tarafından üretilmiş olan iki farklı ebattaki boruya ait kaynak parametreleri incelenmiştir. Söz konusu bu incelemeye temel oluşturan dökümanlar EK 2 ve 3 'de verilmiştir. 1067x17.48 mm ile 969x27,2 mm ebatlı söz konusu bu borulara ait kaynak parametreleri sırasıyla Tablo 4.26 ve 4.27 'de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.31 'de 969x 27,2 mm ebatlı boruya ait kaynak dikişi görülmektedir.



Şekil 4.31. 969x 27,2 mm ebatlı boyuna dikişli boruya ait kaynak dikişi.

Tablo 4.26. 1067x17,48 mm ebatlı boyuna dikişli boruya ait kaynak parametreleri.

	Akım türü	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Serbest Tel Uzunluğu (mm)	Kaynak hızı (m/dk)
İç kaynak	DC	1050	32	4,0	28	1,95
	AC	900	35	4,0	29	
	AC	850	38	4,0	30	
	AC	700	40	4,0	30	
Dış kaynak	DC	1100	29	5,0	29	1,80
	AC	900	35	4,0	29	
	AC	750	38	4,0	29	
	AC	650	40	4,0	30	

Tablo 4.27. 969x27,2 mm ebatlı boyuna dikişli boruya ait kaynak parametreleri.

	Akım türü	Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Serbest Tel Uzunluğu (mm)	Kaynak hızı (m/dk)
İç kaynak	DC	1050	34	4,0	33	1,00
	AC	1050	40	4,0	34	
	AC	750	38	4,0	34	
Dış kaynak	DC	1250	29	5,0	35	1,20
	AC	900	30	4,0	36	
	AC	750	38	4,0	36	
	AC	600	40	4,0	36	

Şekil 4.30 'da ki kaynak dikişine ait geometrik ölçüm sonuçları Tablo 4.28 'de verilmiştir. 27,2 mm kalınlık için hesaplanmış olan teorik kaynak dikişi geometrik büyüklükleri ise Tablo 4.29 'da verilmiştir. Yapılan teorik hesaplamaların ölçüm değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu ise, malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak dikişinin geometrik büyüklüklerinin öngörülmesi amacı ile kullanılan denklemlerin (bkz. Bölüm 4.1.2) uygunluğunu göstermektedir. Her bir kafada kullanılan tel çapı, tel yüksekliği, akım türü ve akım şiddetine bağlı olarak Chandel formülleri yardımı ile kaynak noktasına sevk edilen tel miktarları hesaplanmıştır (Tablo 4.30).

Kaynak ağız ölçüleri ile ilgili herhangi bir bilgiye ulaşılamadığından, toplam dolgu kesit alanı hesap yolu ile (bkz. Denklem 4.3) çıkarılmıştır. Karışım oranı yine spiral dikişli borulara kıyasla daha fazladır. Bunun nedeni ise, kaynak ağız açısının daha fazla olmasıdır (yaklaşık 80°). Tablo 4.31 'den de görülmektedir ki, her bir mm et kalınlığı için yaklaşık 2.10 ile 2,35 J/cm gibi ısı girdileri söz konusudur.

Tablo 4.28. 969x27,2 mm ebatlı borunun kaynak dikişine ait geometrik ölçüler.

	Dikiş alanı (mm ²)	Nufuziyet derinliği (mm)	Kep alanı (mm ²)	Kep yüksekliği (mm)	Kep genişliği (mm)
İç kaynak	262,8	15,37	44,2	2,18	27,2
Dış kaynak	287,6	18,70	32,9	1,84	23,9

Tablo 4.29. 969x27,2 mm için teorik olarak hesaplanmış geometrik büyüklükler.

	Nufuziyet derinliği (mm)	Kep alanı (mm ²)	Kep yüksekliği (mm)	Kep genişliği (mm)
İç kaynak	16,32	43,66	2,36	25,40

Tablo 4.30. Boyuna dikişli borular için tel sarf değerleri ve dolgu kesit alanı.

Malzeme kalınlığı (mm)	İç kaynak			Dış kaynak		
	kg/h	mm²	%	kg/h	mm²	%
27,20	45,98	99,52	37,9	54,06	97,51	33,9
17,48	53,71	59,62		50,06	60,20	

Tablo 4.31. 969x27,2 mm ebatlı boru için ısı girdisi ve soğuma süresi.

Malzeme kalınlığı (mm)	İç kaynak			Dış kaynak		
	E (J/cm)	E/s (J/cm/mm)	t_{8/5} (sn)	E (J/cm)	E/s (J/cm/mm)	t_{8/5} (sn)
27,20	63,7	2,34	59	57,9	2,13	123
17,48	38,6	2,21	53	39,3	2,25	137

4.2. Kaynak Dikişinin Tokluk Özelliklerini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi

Doğal gaz ve petrol iletiminde kullanılan boru hatlarına yönelik kalite istemleri her geçen gün daha da artmaktadır. Bu tür boru hatlarının tasarım aşamalarında, söz konusu bu zorlu çalışma koşullarından dolayı borunun mukavemeti ve/veya kalınlığındaki artışlar kaçınılmaz duruma gelmektedir. Aynı zamanda, hattın güvenliği açısından gerek boru gövdesinde gerekse kaynak dikişinde özellikle düşük sıcaklıklarda oldukça yüksek tokluk özellikleri istenmektedir. Deneysel çalışmaların bu bölümünde, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve kaynak metalinin soğuma hızı gibi kaynak dikişinin tokluk özelliklerini etkileyen faktörler incelenmiş ve bu amaçla çeşitli deneyler yapılmıştır.

4.2.1. Kaynak metalinin kimyasal bileşiminin etkisinin incelenmesi

İlk aşamada 864x8,74 mm ebatlı boruda iç ve dışta tandem kaynak yapılmış olup, ilgili kaynak parametreleri Tablo 4.32 'de, bu parametrelerle elde edilen kaynak dikişi ise Şekil 4.32 'de verilmiştir (Deney 18). Deneylerde, termomekanik haddelenmeye tabi tutulmuş ve hidrojen kırılabilirliğine karşı mukavemeti yüksek bir X-65 çeliği kullanılmıştır. Kullanılan çelik malzemenin kimyasal bileşimi ise Tablo 4.33 'de verilmiştir. Söz konusu bu malzemenin -20 °C 'de ki çentik darbe mukavemeti 170 J 'dur (Tablo 4.34). Tüm kafalarda S2Mo teli kullanılmış olup, bu koşullar altında elde edilen kaynak dikişinin kimyasal bileşimi Tablo 4.33 'de verilmiştir.

Tablo 4.32. Deney 18 'e ait kaynak parametreleri.

		Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Tel cinsi	Isı girdisi (J/mm)	t _{8/5} (sn)	Kaynak hızı (m/dk)
İç kaynak	DC	775	29	3,2	S2Mo	1048	15	2,20
	AC	550	29	3,2	S2Mo			
Dış kaynak	DC	725	29	3,2	S2Mo	929	243	
	AC	450	29	3,2	S2Mo			



Şekil 4.32. Kaynak dikiş görüntüsü (Deney 18).

Tablo 4.33. Malzemenin ve kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (Deney 18).

	C	Si	Mn	P	S	Cu-Ni Cr-Al	Mo	N	Nb	Ti	V
Mal	0,035	0,18	1,10	0,008	0,001	0,296	0,004	0,003	0,057	0,0025	0,064
İç	0,046	0,25	1,18	0,008	0,002	0,239	0,166	0,005	0,036	0,0029	0,044
Dış	0,046	0,25	1,15	0,008	0,002	0,240	0,164	0,005	0,038	0,0028	0,044

Tablo 4.34. Malzemenin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 18).

Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)
1	160	6	165	11	169	16	159
2	170	7	169	12	168	17	144
3	175	8	171	13	169	18	171
4	176	9	167	14	176	19	182
5	169	10	160	15	166	20	182

Kullanılan tel ve tozun etkisi ile kaynak metalindeki C ve Si içeriğinde belirgin bir artışın olduğu görülmektedir. Bunun dışında, kaynak telindeki yüksek Mo içeriği kaynak metalindeki Mo miktarında oldukça yüksek bir artışa yol açmıştır. Malzemenin bileşiminde %0,035 olan C miktarı kaynak dikişinde %0,0046 'ya, %0,004 olan Mo miktarı ise %0,166 'ya kadar yükselmiştir. Mangan 'da ise fazlaca bir değişimin olmadığı görülmektedir. Kükürt, fosfor ve azot oranlarında ise kaynak dikişinin tokluk özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek bir artış olmamıştır. Kaynak dikişinin ve malzemenin değişik sıcaklıklardaki çentik darbe deneyi sonuçları Tablo 4.35 ve 4.36 ile Şekil 4.33 'de görülmektedir.

Tablo 4.35. Kaynak dikişinin -20 °C ‘de ki çentik darbe sonuçları (Deney 18).

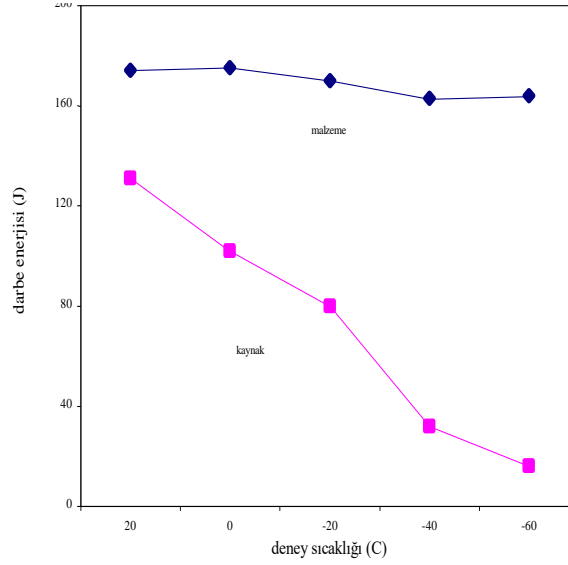
Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)
1	111	16	37	31	40	46	103
2	35	17	44	32	53	47	124
3	125	18	32	33	102	48	126
4	38	19	43	34	129	49	41
5	55	20	37	35	46	50	109
6	59	21	59	36	95	51	90
7	84	22	75	37	95	52	70
8	30	23	43	38	69	53	58
9	50	24	116	39	70	54	105
10	80	25	40	40	86	55	109
11	43	26	56	41	158	56	124
12	110	27	116	42	68	57	112
13	63	28	47	43	109	58	132
14	38	29	75	44	112	59	75
15	136	30	135	45	75	60	125

Tablo 4.36. Değişik sıcaklıklarda malzemenin çentik darbe sonuçları (Deney 18).

No	Malzeme			
	20 °C	0 °C	-40 °C	-60 °C
1	179	177	161	157
2	168	174	171	163
3	174	175	157	177

Tablo 4.37. Değişik sıcaklıklarda kaynak dikişi çentik darbe sonuçları (Deney 18).

No	Kaynak			
	20 °C	0 °C	-40 °C	-60 °C
1	130	90	44	14
2	135	102	25	17
3	127	114	27	18



Şekil 4.33. Malzeme ve kaynak dikişinin geçiş sıcaklık eğrisi (Deney 18).

Deneyleerin ikinci aşamasında tüm diğer parametreler aynı tutulurken sadece kaynak tellerinin cinsi değiştirilerek, tüm kafalara S2Mo yerine Mn içeriği daha fazla olan S3Mo teli takılmıştır (Deney 19). S3Mo tel kullanımı ile kaynak metalindeki Mn miktarının artırılması ve artan Mn içeriği ile çentik darbe tokluğunda artış sağlanması hedeflenmiştir. Bu koşullar altında elde edilen kaynak dikişinin kimyasal bileşimi Tablo 4.38 'de verilmiştir. S3Mo tel kullanımı ile kaynak dikişindeki Mn miktarındaki artış net bir şekilde görülmektedir. -20 °C 'de ki kaynak dikişi çentik darbe test sonuçları Tablo 4.39 'da verilmiştir. Kaynak dikişindeki Mn artışı ile birlikte, çentik darbe dayanımında arttığı görülmektedir. Üçüncü aşamada ise elektriksel parametreler yine aynı kalırken, kaynak telleri bir kez daha değiştirilmiş, DC kafalara S3MoTiB tipi tel takılırken AC kafalarda ise S2Mo cinsi tel kullanılmıştır (Deney 20). Bu koşullar altında elde edilen kaynak dikişinin kimyasal bileşimi Tablo 4.40 'da verilmiştir. S3MoTiB tel kullanımı ile çentik darbe dayanımının da arttığı görülmektedir (Tablo 4.41).

Tablo 4.38. İç ve dış kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (Deney 19).

	C	Si	Mn	P	S	Cu-Ni Cr-Al	Mo	N	Nb	Ti	V
İç	0,050	0,25	1,34	0,008	0,002	0,255	0,170	0,0061	0,035	0,0028	0,043
Dış	0,046	0,24	1,30	0,008	0,002	0,262	0,154	0,0055	0,039	0,0029	0,045

Tablo 4.39. Kaynak dikişinin -20 °C ‘de ki çentik darbe sonuçları (Deney 19).

Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)
1	98	9	137	17	104	25	110
2	142	10	148	18	144	26	51
3	151	11	138	19	138	27	113
4	146	12	82	20	78	28	118
5	141	13	138	21	144	29	152
6	135	14	148	22	116	30	115
7	128	15	107	23	166		
8	133	16	142	24	95		

Tablo 4.40. İç ve dış kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (Deney 20).

	C	Si	Mn	P	S	Cu-Ni Cr-Al	Mo	N	Nb	Ti	V
İç	0,044	0,28	1,26	0,010	0,002	0,249	0,175	0,006	0,036	0,0277	0,044
Dış	0,044	0,29	1,27	0,011	0,002	0,250	0,166	0,006	0,039	0,0254	0,046

Tablo 4.41. Kaynak dikişinin -20 °C ‘de ki çentik darbe sonuçları (Deney 20).

Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)
1	160	9	142	17	163	25	139
2	130	10	132	18	153	26	130
3	174	11	151	19	149	27	134
4	158	12	162	20	157	28	129
5	144	13	160	21	128	29	152
6	142	14	163	22	119	30	159
7	110	15	174	23	128		
8	142	16	139	24	134		

Çalışmanın dördüncü aşamasında, diğer tüm parametreler aynı kalırken daha farklı bir kimyasal bileşime sahip (Tablo 4.42), bir ince taneli yüksek mukavemetli X-65 çeliği kullanılmıştır (Deney 21). Daha önce kullanılan malzemeden farklı olarak, bu deneyde kullanılan çelik malzemenin C içeriği daha az, buna karşın Mn içeriği

daha yüksektir, ayrıca belirli bir oranda Mo içeriği söz konusudur. Bunun dışında, mikrolaşım elementleri olarak Nb ve V ‘un yanı sıra Ti ‘da kullanılmıştır. Söz konusu malzemenin -20 °C ‘de ki çentik darbe dayanımı 187 J ‘dur (Tablo 4.43). Tüm kafalarda S2Mo teli kullanılmış olup, bu şartlar altında elde edilen kaynak dikişinin kimyasal bileşimi Tablo 4.42 ‘de verilmiştir. Malzemenin kimyasal bileşimindeki farklılık, kaynak dikişinin çentik darbe mukavemetinin 97 J ‘e çıkmasına yol açmıştır (Tablo 4.44).

Tablo 4.42. Malzeme ve kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (Deney 21).

	C	Si	Mn	P	S	Cu-Ni Cr-Al	Mo	N	Nb	Ti	V
Mal	0,021	0,23	1,34	0,003	0,001	0,350	0,057	0,002	0,053	0,0140	0,060
İç	0,040	0,28	1,29	0,003	0,002	0,260	0,222	0,004	0,032	0,0070	0,040
Dış	0,038	0,28	1,34	0,003	0,002	0,274	0,209	0,006	0,036	0,0070	0,040

Tablo 4.43. Malzemenin -20 °C ‘de ki çentik darbe sonuçları (Deney 21).

Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)
1	196	7	192	13	183	19	182
2	211	8	196	14	182	20	184
3	185	9	182	15	182	21	168
4	180	10	189	16	178	22	192
5	214	11	176	17	190	23	197
6	184	12	174	18	188	24	183

Tablo 4.44. Kaynak dikişinin -20 °C ‘de ki çentik darbe sonuçları (Deney 21).

Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)
1	128	7	49	13	144	19	104
2	64	8	71	14	43	20	124
3	106	9	95	15	105	21	96
4	128	10	47	16	57	22	102
5	127	11	87	17	108	23	117
6	115	12	104	18	107	24	115

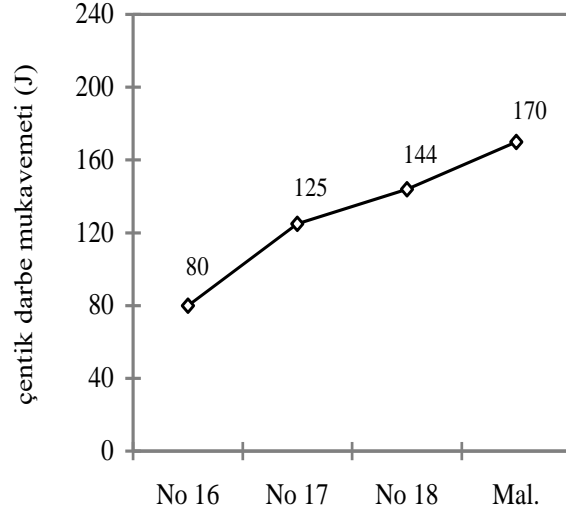
Tablo 4.45. Kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (Deney 18, 19 ve 20).

Deney No	C	Si	Mn	P	S	Cu-Ni Cr-Al	Mo	N	Nb	Ti	V
Mal	0,035	0,18	1,10	0,008	0,001	0,296	0,004	0,003	0,057	0,0025	0,064
16	0,046	0,25	1,16	0,008	0,002	0,240	0,165	0,005	0,037	0,0028	0,044
17	0,048	0,24	1,31	0,008	0,002	0,258	0,162	0,006	0,037	0,0029	0,044
18	0,044	0,28	1,26	0,010	0,002	0,250	0,171	0,006	0,037	0,0265	0,045

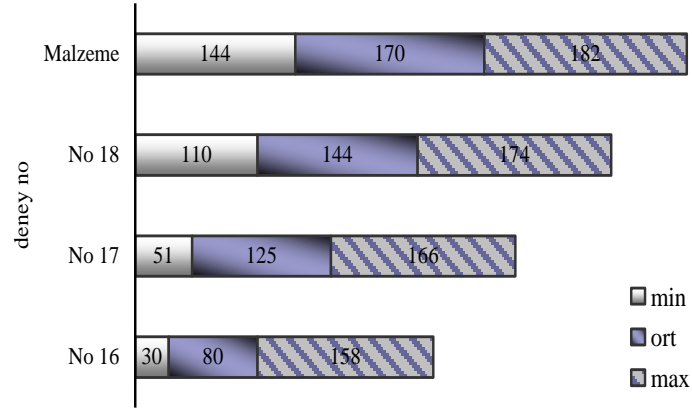
Deney 18, 19 ve 20 ‘de elde edilen iç ve dış kaynağın kimyasal bileşimlerinin ortalaması, her bir deney sonrası elde edilen kaynak dikişinin kimyasal bileşimini verecektir (Tablo 4.45). Yapılan deneysel çalışmaların ışığı altında, genel olarak kaynak dikişindeki alaşım elementlerinin kaynak dikişinin tokluk özellikleri üzerindeki etkisini aşağıdaki gibi özetlemek olanaklıdır;

Çeliğin bileşimindeki C miktarı arttıkça malzeme o denli sert ve gevrek olur, sıcak çatlak ve sertleşme çatlak tehlikesi artar. Çeliğin bileşiminde ki C miktarının azalması, aynı zamanda, hidrojen kırılma tehlikesine karşı direncini de artırır. Deneysel çalışmalarda elde edilen kaynak dikişinin C içeriğinin %0,05 ‘in altında kaldığı görülmektedir. Bu ise kaynak dikişinin tokluk özelliklerini olumsuz yönde etkilemeyecek bir orandır. Bu nedenle, deneylerde kullanılan tel ve tozun malzemeye uyumlu olduğu ve yine seçilen kaynak parametrelerinin de (özellikle kaynak teli ile esas metalin karışım oranının) uygun olduğunu söylenebilir.

Mangan kırılma tokluğunu iyileştirici yönde bir etkiye sahiptir. Ancak, çeliğin bileşimindeki mangan artışı sertlik artışına ve dolayısıyla çatlak oluşum tehlikesinin artmasına neden olur. Alaşımız çelikler %1,6 ‘ya kadar mangan içerebilirler. Kaynak dikişindeki Mn miktarının artması ile tokluk değerlerinde de artış olduğu görülmektedir. S2Mo tel yerine daha yüksek Mn içerikli S3Mo tel kullanımı ile kaynak metalindeki Mn miktarı %1,16 ‘dan %1,31 ‘e çıkmıştır. Bunun sonucunda, -20 °C ‘de ki çentik darbe mukavemeti 80 J değerinden yaklaşık %56 ‘lık bir artışla 125 J değerine yükselmiştir (Şekil 4.34).



Şekil 4.34. - 20 °C ‘de ki çentik darbe mukavemetinin değişimi (864x8,74 mm).



Şekil 4.35. Çentik darbe deney sonuçlarının minimum, maksimum ve ortalama değerlerinin gösterimi (Deney 18, 19 ve 20).

Mn artışının yanında kaynak metalindeki Ti miktarının artması tokluk özelliklerini daha da iyileştirmiştir. -20 °C ‘de ki çentik darbe mukavemeti 80 J değerinden 144 J değerine yükselmiştir (Şekil 4.35). Titanyum, tokluğu düşürücü yönde etkisi olan zararlı elementler grubunda ki serbest oksijen ve azotu TiO ve TiN olarak bağlar ve dolaylı olarak tokluğu iyileştirir. Ayrıca, Ti artışı ile çentik darbe deney sonuçları daha homojen bir duruma gelmiştir (Şekil 4.35). Oksit ve kükürt giderme özelliği olan Silisyum, çeliklerde alaşım elementlerinin düzenli olarak yayılmasını sağlar. Ancak, Si miktarının artırılması sünekliği azaltarak kaynak bağlantısını daha gevrek yapar. Alaşımız çeliklerde %0,5 ‘e kadar silisyum bulunabilir. Kırılma tokluğunun önem taşıdığı uygulamalarda kullanılan

çeliklerde, fosfor miktarı olabildiğince düşük tutulmalıdır. Bu nedenle, kaynak metalindeki fosfor miktarına sınırlama getiriliyorsa bunu sağlamanın en güvenilir yolu; tel, toz ve metalin bileşimindeki toplam fosfor miktarının kaynak metalinde istenen miktardan daha az olmasını sağlamaktır. Çeliklerde mukavemet artırma amacıyla yaygın olarak kullanılan bir mikroalaşımlama elementi olan Nb ‘un %0,1 ‘i geçmesi halinde soğuk çatlak ya da tokluk azalması tehlikesi artar. Çelikte çözülmüş olan azot atomları malzemenin şekil değiştirme kabiliyetini azaltır ve malzemeyi gevrekleştirir. Bu nedenle, azot miktarının %0,01 ‘i aşmaması gerekir.

4.2.2. Kaynak metalinin soğuma hızının etkisinin incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, kaynak dikişinin tokluk özellikleri üzerinde soğuma hızının etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada da HIC ‘e karşı dayanımı yüksek olan ve %0,04 C, %1,1 Mn içeren Nb ve V ile mikro alaşımlama yapılmış ince taneli yüksek mukavemetli bir X-65 çeliği kullanılmıştır. Malzemenin -20 °C ‘de ki tokluk değeri 270 J ‘dür. İç ve dış kaynağın soğuma süresi Rosenthal ve Rykalin ‘e göre (bkz. Bölüm 2.4.2.3) hesaplanmıştır.

$$\Delta t_{8/5} = \frac{1}{2\pi\lambda} \eta EF_3 \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \quad (2.19)$$

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

Bilindiği gibi, soğuma hızına etki eden başlıca faktörler ana metalin başlangıç sıcaklığı, uygulanan enerji girdisi ve malzeme kalınlığıdır. Bu faktörlerden ana metalin başlangıç sıcaklığının etkisini görebilmek için 1067x11,91 mm ebatlı boruda bir dizi deneme yapılmıştır. Öncelikle, iç ve dış kaynağın soğuma hızı aynı olacak şekilde elektriksel parametreler ve kaynak hızı değiştirilmiştir. Deneme çalışmalarının bu bölümde, kaynak parametreleri öncelikle kaynak hızı 2,00 m/dk olacak şekilde ayarlanmıştır (Deney 22).

Daha sonra, kaynak hızı 1.50 m/dk ‘ya (Deney 23) ve son olarak da 1,20 m/dk ‘ya (Deney 24) düşürülmüştür. Her üç denemeye ait olan kaynak parametreleri sırasıyla Tablo 4.46, 4.47 ve 4.48 ‘de, bu koşullar altında elde edilen kaynak dikiş görüntüleri Şekil 4.36 ‘da ve sertlik ölçüm sonuçları ise Şekil 4.37 ‘de verilmiştir. -20 °C ‘de ki çentik darbe test sonuçları, her üç deneyi de kapsayacak şekilde Tablo 4.49 ‘da verilmiştir.

Tablo 4.46. Deney 22 ‘ye ait kaynak parametreleri.

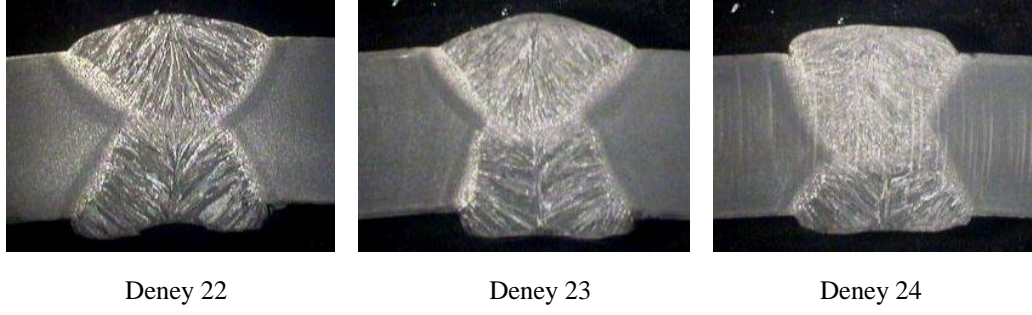
		Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Tel türü	Isı girdisi (J/mm)	t _{8/5} (sn)	Kaynak hızı (m/dk)
İç kaynak	DC	800	28	3,2	S3Mo	1680	22	2,00
	AC	725	28	3,2	S3Mo			
	AC	475	28	3,2	S2Mo			
Dış kaynak	DC	800	29	3,2	S3Mo	1281	214	
	AC	650	30	3,2	S3Mo			

Tablo 4.47. Deney 23 ‘e ait kaynak parametreleri

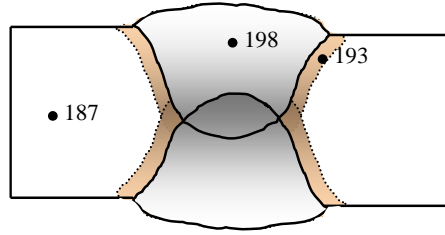
		Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Tel türü	Isı girdisi (J/mm)	t _{8/5} (sn)	Kaynak hızı (m/dk)
İç kaynak	DC	800	28	3,2	S3Mo	1679	22	1,50
	AC	675	29	3,2	S3Mo			
Dış kaynak	DC	700	28	3,2	S3Mo	1288	217	
	AC	450	28	3,2	S3Mo			

Tablo 4.48. Deney 24 ‘e ait kaynak parametreleri.

		Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Tel türü	Isı girdisi (J/mm)	t _{8/5} (sn)	Kaynak hızı (m/dk)
İç kaynak	DC	725	28	3,2	S3Mo	1668	21	1,20
	AC	450	29	3,2	S3Mo			
Dış kaynak	DC	875	29	3,2	S3Mo	1269	210	



Şekil 4.36. Deney 22, 23 ve 24 'e ait kaynak dikişi görüntüleri (1067x11,9 mm).



Şekil 4.37. Deney 22, 23 ve 24 'e ait sertlik dağılımı (Hv).

Tablo 4.49. Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe mukavemeti (J).

Deney parça no	Deney sonucu (J)		
	Deney 22	Deney 23	Deney 24
1	49	54	66
2	66	66	38
3	69	70	68
4	67	41	50
5	68	38	68
6	39	67	83
7	88	69	57
8	39	34	61
9	65	53	37
10	56	58	49
11	57	49	59
12	51	42	57
13	38	71	38
14	49	97	42
15	52	57	57

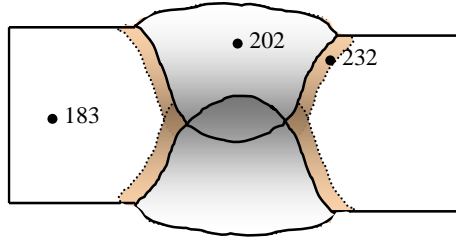
Görüldüğü gibi, elektriksel parametreler farklı olmasına rağmen, 1,20 m/dk, 1,50 m/dk ve 2.00 m/dk kaynak hızlarında elde edilen kaynak dikişinin -20 °C ‘deki çentik darbe dayanımları sırasıyla 55 J, 58 J ve 57 J gibi birbirlerine çok yakın değerlere sahiptir (Tablo 4.49). Bunun sebebi ise, uygulanan enerji girdisinin aynı olmasıdır. Ancak, enerji girdisi tek başına belirleyici bir etken olmayıp, aynı enerji girdisinde fakat farklı metal başlangıç sıcaklıklarında daha farklı çentik darbe dayanım sonuçları elde edilebilir. Bu amaçla yapılan çalışmada, Deney 22 ‘de ki tüm parametreler sabit tutulmuştur. Ancak, burada iç kaynak sonrası kaynak makinası yaklaşık 30 dakika süreyle durdurularak, dış kaynak öncesi malzeme sıcaklığının 10 °C ‘ye kadar düşmesi sağlanmıştır (Deney 25). Böylelikle, dış kaynağın soğuma süresi azaltılmıştır (Tablo 4.50). Bu koşullar altında elde edilen kaynak dikişinin görüntüsü Şekil 4.38 ‘de, sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.39 ‘da ve -20 °C ‘de ki çentik darbe test sonuçları Tablo 4.51 ‘de verilmiştir.

Tablo 4.50. Deney 25 ‘e ait kaynak parametreleri.

		Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Tel türü	Isı girdisi (J/mm)	t _{8/5} (sn)	Kaynak hızı (m/dk)
İç kaynak	DC	800	28	3,2	S3Mo	1680	22	2,00
	AC	725	28	3,2	S3Mo			
	AC	475	28	3,2	S2Mo			
Dış kaynak	DC	800	29	3,2	S3Mo	1281	14	
	AC	650	30	3,2	S2Mo			



Şekil 4.38. Kaynak dikişinin görüntüsü (Deney 25).

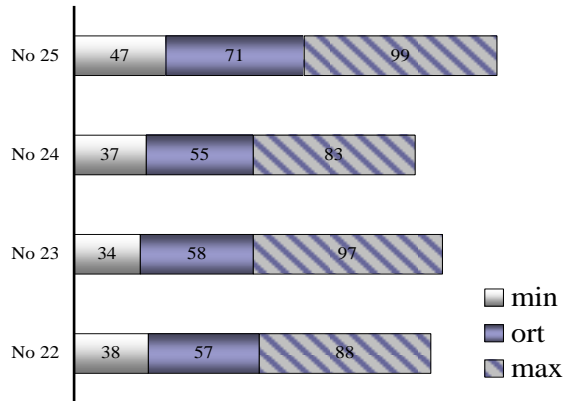


Şekil 4.39. Deneysel 25 'e ait sertlik dağılımı (Hv).

Tablo 4.51. Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deneysel 25).

Deneysel parça no	Deneysel sonucu (J)	Deneysel parça no	Deneysel sonucu (J)	Deneysel parça no	Deneysel sonucu (J)	Deneysel parça no	Deneysel sonucu (J)
1	86	6	76	11	75	16	63
2	75	7	83	12	99	17	60
3	87	8	57	13	75	18	47
4	66	9	91	14	61		
5	49	10	53	15	67		

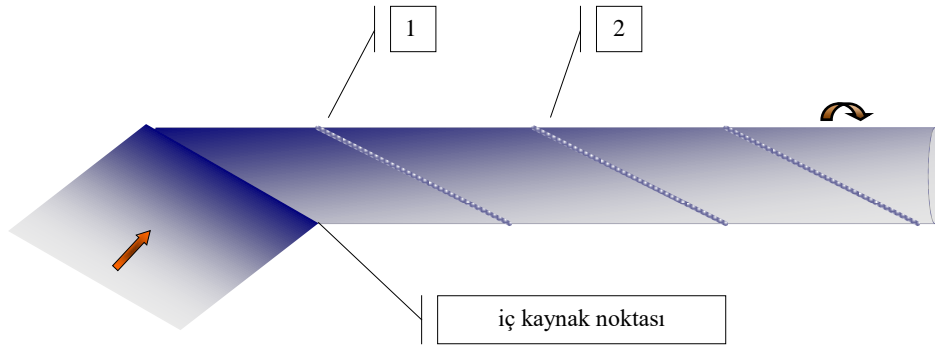
Dış kaynağın soğuma süresinin azalmasıyla; diğer bir deyişle, daha hızlı bir soğumanın gerçekleşmesi ile birlikte, kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe dayanımı 57 J 'den 71 J 'e yükselmiş (Şekil 4.40), buna karşın dış kaynağın IEB bölgesinin sertliği 193 Hv 'den 232 Hv 'ye çıkmıştır (Şekil 4.37 ve 4.39). Ayrıca, Şekil 4.36 ve 4.38 'den de görüldüğü gibi daha soğuk bölgede kaynak yapıldığı için, dış kaynağın kesit alanı azalmıştır.



Şekil 4.40. Çentik darbe deney sonuçlarının minimum, maksimum ve ortalama değerlerinin gösterimi (Deneysel 22, 23, 24 ve 25).

Görüldüğü gibi, metalin başlangıç sıcaklığı da kaynak dikişinin tokluk özelliklerine etki eden çok önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Spiral dikişli boru üretiminde bu faktörü, dış kaynak noktasının yerinin değiştirilmesi ile kontrol etmek olanaklıdır. Bilindiği gibi, tozaltı kaynağı ile spiral dikişli boru üretiminde kaynak iç ve dış kaynak olmak üzere iki aşamalı olarak yapılmaktadır. Düz olarak ilerleyen banda açılı olarak verilen form verme işleminden hemen sonra (diğer bir deyişle bant kenarlarının birleşiminden hemen sonra) iç kaynak yapılmaktadır (Şekil 4.41). Daha sonra, borunun yaklaşık 1/2 hatve dönerek ilerlemesi sonucunda iç kaynak noktasının Şekil 4.41 ‘de gösterilen “1” konumuna geldiği anda ise dış kaynak işlemi gerçekleştirilmektedir.

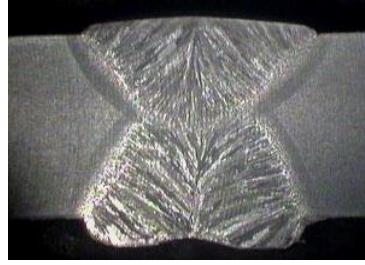
Bu pozisyonda, temas yüzeyli termometre ile yapılan sıcaklık ölçümlerinde, kaynak öncesi malzeme sıcaklığının 350-360 °C arasında olduğu saptanmıştır. Dış kaynak noktasının yeri “1” pozisyonundan “2” pozisyonuna kaydırılarak iç kaynak ile dış kaynak noktası arasındaki mesafe 1 1/2 hatveye çıkartıldığında ise mesafenin uzaması nedeni ile dış kaynak öncesi malzeme sıcaklığının 150 °C ‘ye düştüğü görülmüştür. Dış kaynak öncesi metal sıcaklığının kaynak dikişinin tokluk özellikleri üzerindeki etkisini görmek için yapılan deneysel çalışmalarda, 1067x11,91 mm ebatlı boruda elektriksel kaynak parametreleri sabit tutulurken dış kaynak noktasının yeri değiştirilmesi ile dış kaynağın soğuma süresi azaltılmıştır. Dış kaynak noktası önce “1” pozisyonunda (Deney 26) ve daha sonra “2” pozisyonundadır (Deney 27) . Her iki duruma ait olan ilgili kaynak parametreleri Tablo 4.52 ‘de, elde edilen kaynak dikişi görüntüleri ise Şekil 4.42 ‘de verilmiştir.



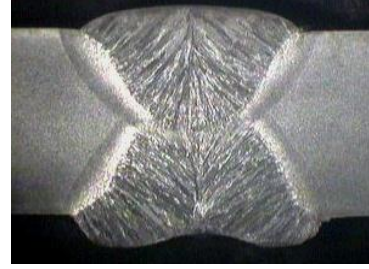
Şekil 4.41. Spiral dikişli boru kaynağında iç ve dış kaynak noktalarının yeri.

Tablo 4.52. Deney 26 ve 27 'ye ait kaynak parametreleri.

		Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Tel türü	Isı girdisi (J/mm)	Kaynak hızı (m/dk)
İç kaynak	DC	850	28	4,0	S3Mo	1736	2,00
	AC	700	29	3,2	S3Mo		
	AC	475	29	3,2	S3Mo		
Dış kaynak	DC	850	29	4,0	S3Mo	1175	
	AC	500	29	3,2	S3Mo		



Deney 26



Deney 27

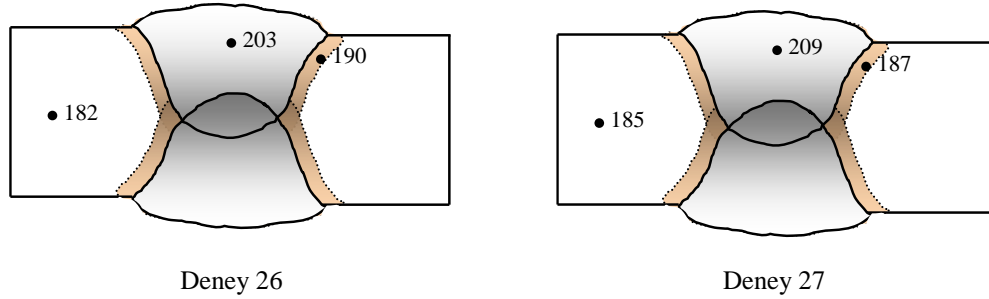
Şekil 4.42. Kaynak dikişinin görüntüsü (Deney 26 ve 27).

Tablo 4.53. Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 26).

Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)
1	114	11	84	21	50	31	69
2	49	12	55	22	97	32	38
3	61	13	49	23	57	33	82
4	48	14	84	24	50	34	72
5	58	15	58	25	44	35	33
6	76	16	76	26	49	36	49
7	48	17	43	27	67	37	55
8	63	18	46	28	42	38	85
9	72	19	37	29	52	39	73
10	74	20	103	30	69	40	48

Tablo 4.54. Kaynak dikişinin -20 °C ‘de ki çentik darbe sonuçları (Deney 27).

Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)	Deney parça no	Deney sonucu (J)
1	83	11	93	21	94	31	80
2	57	12	83	22	51	32	50
3	61	13	69	23	77	33	67
4	88	14	120	24	71	34	99
5	61	15	89	25	59	35	75
6	65	16	73	26	79	36	62
7	100	17	75	27	63	37	63
8	77	18	46	28	71	38	54
9	59	19	58	29	95	39	89
10	69	20	81	30	61	40	62



Şekil 4.43. Deney 26 ve 27 ‘ye ait sertlik dağılımı (Hv).

Dış kaynağın soğuma süresi deney 26 ‘da 209 sn ve deney 27 ‘de 29 sn olarak hesaplanmıştır. İç kaynağın soğuma süresi ise her iki durumda da 22 sn ‘dir. Dış kaynak soğuma süresinin 209 sn olduğu deney 26 ‘ya ait çentik darbe tokluğu 62 J iken, soğuma süresinin 29 sn ‘ye düştüğü deney 27 ‘de 73 J ‘e yükselmiştir (Tablo 4.53 ve 4.54). Buradan da görüldüğü gibi, soğuma süresinin azalması yani hızlı soğuma ile birlikte kaynak dikişinin tokluk özelliklerin de iyileşme olmaktadır. Hızlı soğuma ile birlikte, özellikle kaynak metalinde bir sertlik artışı olduğu görülmektedir (Şekil 4.43). Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, dış kaynak noktasının yerinin değiştirilmesi ile kaynak öncesi metal sıcaklığını ve dolayısıyla da dış kaynağın soğuma süresini kontrol etme olanağı vardır.

4.2.3. Dış kaynak dikişi IEB bölgesinin kaynak metalinin tokluk özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi

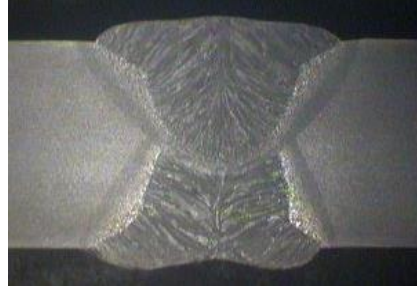
Bu bölümde, 1067x15,88 mm ebatlı boruda dış kaynak dikişi IEB bölgesinin kaynak dikişinin çentik darbe mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada da HIC 'e karşı dayanımı yüksek olan ince taneli yüksek mukavemetli bir X-65 çeliği kullanılmıştır. Kullanılan elektriksel parametreler Tablo 4.55 'de, kullanılan malzemenin ve elde edilen kaynak dikişinin kimyasal bileşimi Tablo 4.56 'da verilmiştir. Deneysel çalışmanın ilk aşamasında; öncelikle, sadece iç kaynak bölgesini (Deney 28) ve daha sonra sadece dış kaynak bölgesini (Deney 29) içerecek şekilde çentik darbe test numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 4.44). Numune yüksekliği 7,5 mm olarak alınmıştır. -20 °C 'de ki çentik darbe test sonuçları Tablo 4.57 'de verilmiştir. Son aşamada ise, hem iç hem de dış kaynak bölgesini içerecek şekilde, sadece kaynak orta bölgesinden çentik darbe deney numuneleri hazırlanmıştır (Deney 30). Bu deney numuneleri, aynı zamanda dış kaynak sonrası iç kaynak bölgesinde oluşan IEB bölgesini de içermektedir.

Tablo 4.55.1067x15,88 mm ebatlı boruya ait kaynak parametreleri.

		Akım şiddeti (A)	Ark gerilimi (V)	Tel çapı (mm)	Tel türü	Isı girdisi (J/mm)	t _{8/5} (sn)	Kaynak hızı (m/dk)
İç kaynak	DC	850	29	4,0	S3MoTiB	2569	28	1,40
	AC	700	29	3,2	S2Mo			
	AC	500	30	3,2	S2Mo			
Dış kaynak	DC	800	29	3,2	S3MoTiB	1894	306	
	AC	700	30	3,2	S2Mo			

Tablo 4.56. Malzeme ve kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (1067x15,88 mm).

	C	Si	Mn	P	S	Cu-Ni Cr-Al	Mo	N	Nb	Ti	V
Mal.	0,034	0,22	1,34	0,008	0,001	0,352	0,051	0,004	0,055	0,0020	0,056
İç	0,047	0,27	1,38	0,007	0,002	0,273	0,234	0,006	0,034	0,0237	0,038
Dış	0,048	0,27	1,40	0,008	0,002	0,270	0,242	0,011	0,033	0,0245	0,038



Deney 28



Deney 29



Deney 30

Şekil. 4.44. Çentik darbe deney parçalarının hazırlanışı (1067x15,88 mm).

Tablo 4.57. İç ve dış kaynak bölgesi ile kaynak orta bölgesinin -20 °C ‘de ki çentik darbe mukavemeti sonuçları (ebat: 1067x15,88 mm, numune yüksekliği: 7,5 mm).

Deney parça no	Deney sonucu (J)		
	Deney 28	Deney 29	Deney 30
1	91	101	80
2	90	100	76
3	101	104	62
4	106	92	94
5	114	82	71
6	111	123	95
7	102	111	103
8	101	90	94
9	109	136	78
10	90	94	66
11	124	101	86
12	91	72	79

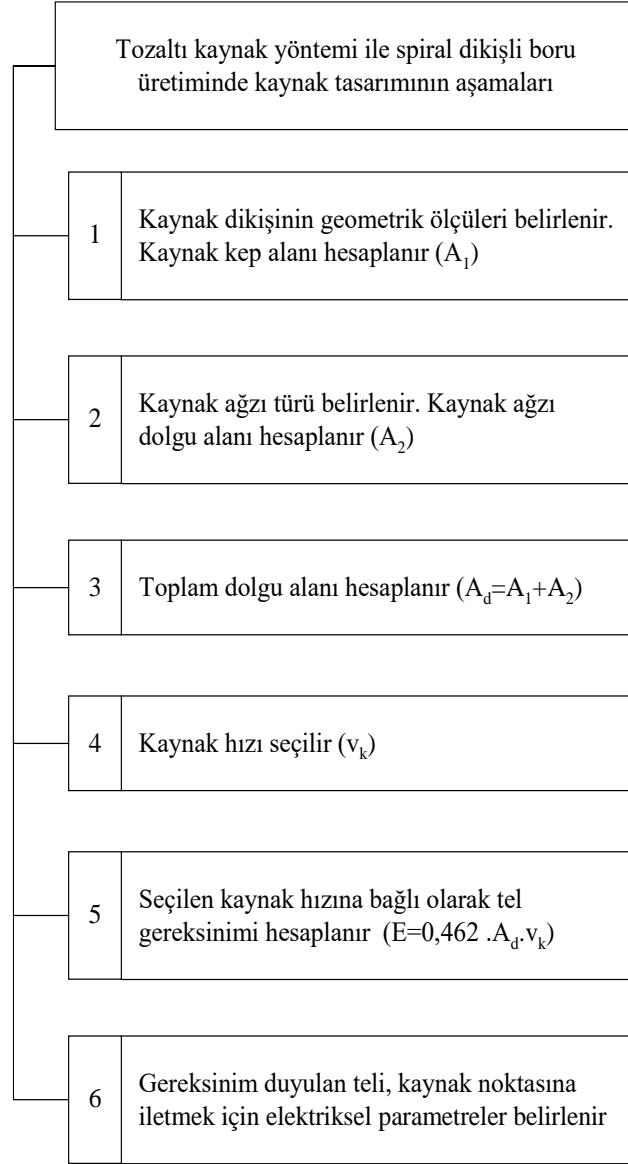
Tablo 4.57 'den, iç ve dış kaynağın çentik darbe deney sonuçlarının birbirine son derece yakın olduğu görülmektedir. Elde edilen ortalama değerler sırasıyla, 103 J ve 101 J 'dur. Deney 30 'da elde edilen çentik darbe deney sonucu ise ortalama 82 J 'dur. Deney 28 ve 29 ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %20 oranında bir azalma olduğu görülmektedir (Tablo 4.57). Bunun olası nedeni ise, dış kaynak sonrası, iç kaynak dikişinin ısı çevrim altında kalan belirli bir bölgesinde oldukça iri taneli bir bölge oluşmasıdır.

Yapı özellikleri nedeni ile kaynak dikişinin en zayıf yeri olan bu bölgenin tokluk açısından yaratacağı olumsuz etkileri en aza indirmek için, dış kaynak sonrası ısı çevrim altında kalan bu bölgenin sınırlandırılması gerekir. Bunun sağlanması için iki farklı çözüm vardır, bunlar; dış kaynak öncesi, iç kaynak bölgesinin sıcaklığı olabildiğince düşük tutulmasıdır. Bunun için de, dış kaynak noktasının yeri değiştirilebilir. İkinci çözüm ise, dış kaynak işleminin olabildiğince düşük ısı girişi ile yapılmasıdır.

BÖLÜM 5. TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ İLE SPİRAL DİKİŞLİ BORU ÜRETİMİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Kaynak dikiş kalitesi üzerinde oldukça etkili olan kaynak parametrelerinin iyi bilinmesi ve kontrol altında tutulması yüksek kaynak güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Yüksek basınçlara güvenle cevap verebilecek kalite düzeyini yakalayabilmek ve aynı zamanda yüksek üretim hızlarına ulaşabilmek için söz konusu bu parametrelerin uygun bir şekilde bir araya getirilmesi gereklidir. Tüm bunlar, kaynak işlemi öncesi kaynak tasarım çalışmasının önemini ortaya çıkarmaktadır. Kaynak tasarımının belirli kriterlerin ışığı altında ve belirli bir yöntem altında yapılması, hatasız ve güvenilir bir kaynak bağlantısı için zorunludur. Kaynak tasarımının temel koşulu, öncelikle kaynak dikişinden talep edilen özelliklerin yani beklentinin iyi anlaşılmasıdır. Çoğu durumda, kaynak tasarım aşamalarında kaynak bağlantısının kullanım yeri ve kullanım koşulları, kullanılan çelik malzemenin türü, malzeme kalınlığı, kaynak metalinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri, kullanılacak olan kaynak telinin ve tozunun seçimi, elde edilecek olan kaynak dikişinin geometrik boyutları, kaynak akımı, kaynak gerilimi, kaynak ağzı biçimi, tel çapı, kafa sayısı, akım türü, kaynak hızı, malzemeye uygulanacak olan enerji girdisi, kaynak metalinin soğuma hızı ve ekonomik üretim koşulları gibi birçok etkenin göz önüne alınması gereklidir. Bu ise beraberinde oldukça kapsamlı bir çalışmayı getirmektedir.

Yapılmış olan deneysel çalışmalardan da yararlanarak, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, olabilen en yüksek kaynak hızlarında yüksek kalite özelliklerinin elde edilmesine olanak sağlayacak şekilde, üretim öncesi kaynak tasarımına yönelik olarak yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yöntemi ana hatları ile malzeme kalınlığı ve üretim standardına göre elde edilmek istenen kaynak dikişinin geometrik boyutlarının öngörülmesi, daha sonra bu dikişi elde edebilmek için gereksinim duyulan tel miktarının belirlenmesi ve bu belirlenen telin kaynak noktasına iletilmesi şeklinde özetleme olanağı vardır (Şekil 5,1).



Şekil 5.1. Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde kaynak tasarım işleminin aşamaları.

Tüm bu değerlendirmelerin ışığı altında, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, kaynak akımı, kaynak gerilimi, kaynak ağzı biçimi, tel çapı, kafa sayısı, akım türü ve kaynak hızı gibi kaynak parametrelerinin belirlemesi yöntemi aşağıda verildiği gibi yapılabilir;

1.Adım. Üretilen borunun üretim standardı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak, elde edilecek olan kaynak dikişinin geometrik ölçüleri belirlenir. Bu amaçla, Bölüm 4.1.2 'de verilmiş olan formüllerden faydalanmak mümkündür.

Denklem 4.7 ve 4.9 ile kaynak dikişinin genişliği, denklem 4.8 ile kaynak kepinin yüksekliği ve denklem 4.11 ile de kaynak kepinin alanı hesaplanır. Burada, h kaynak kep yüksekliğini, s kaynak dikiş genişliğini, t malzeme kalınlığını, A ise kaynak kepinin kesit alanını ifade etmektedir. Gaz boruları için $r = 1,30 \times t$ ve su boruları için $r = 1,15 \times t$ olarak alınabilir.

$$h = 1 + (0,05 \cdot t) \quad (4.8)$$

$$r = (h / 2) + (s^2 / 8h) \quad (4.7)$$

$$A_d = (h / 6s) \cdot (3h^2 + 4s^2) \quad (4.6)$$

$$A_e = (S \cdot h \cdot \pi) / 2 \quad (4.10)$$

$$A = (A_d + A_e) / 2 \quad (4.11)$$

2.Adım. Malzeme kalınlığına bağlı olarak açılması gereken kaynak ağzı belirlenir. 7 mm malzeme kalınlığına kadar kaynak ağzı açmaya gerek yoktur. Daha kalın parçalara ise Y veya X türü kaynak ağzı açılabilir. Kaynak ağzı derinliği, işlerlik oranına göre saptanmalıdır. Gaz borularında iç ve dış dikişin birbirlerine olan işlerliği, malzeme kalınlığının en az %20 'si kadar olmalıdır. Bu ise, iç ve dış dikişin nufuziyet derinliğinin malzeme kalınlığının yaklaşık %60 'ı kadar olması demektir. Söz konusu bu nufuziyet derinliğinin elde edilebilmesi, Y türü kaynak ağzında kaynak ağzı derinliğinin malzeme kalınlığının en az %40 'ı kadar olmasını gerektirir. Su ve kazık borularında ise işlerlik oranı malzeme kalınlığının %10 'u kadar ve buna bağlı olarak Y türü kaynak ağzında, kaynak ağzı derinliğinin kalınlığın %35 'i kadar olması yeterlidir. X türü kaynak ağzında ise, kaynak ağzı derinliği gaz boruları için alın yüksekliği 6 mm, su borularında ise 7 mm olacak şekilde ayarlanabilir. Kaynak ağız açısı en az 60° olmalıdır.

3.Adım. Belirlenmiş olan kaynak ağzı biçiminden de kaynak ağzı dolgu alanı (A_1) hesaplanır. Kaynak ağzı dolgu alanı ile hesaplanmış olan kaynak kepi kesit alanının (A_2) toplamı, toplam dolgu kesit alanını verir (A_d). Buradan da bir metrelik dikiş uzunluğu boyunca gereksinim duyulan tel miktarı belirlenir.

$$A_d = A_1 + A_2$$

4.Adım. Boru çapına bağlı olarak iç ve dış kaynakta kullanılabilir maksimum kaynak kafa sayısı belirlenir. Mannesmann Boru uygulamasında; iç kaynakta, 406 mm ‘den küçük çaplı borularda tek kafa, 406 ile 609 mm arasındaki borularda çift kafa ve 609 mm ve üstü borularda ise üç kafa kullanılmaktadır. Dış kaynakta ise en çok iki kafa kullanım olanağı vardır.

5.Adım. Her bir kafada kullanılacak olan maksimum akım şiddeti ve buna bağlı olarak iletilebilecek tel miktarları, Chandel tarafından geliştirilmiş olan formüller yardımı ile hesaplanır (Denklem 2.1 ve 2.2). Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, tel çapına bağlı olarak kullanılabilir maksimum akım şiddeti değerleri Tablo 5.1 ‘de verilmiştir.

$$MR_{DC(+)} = 0.010371 \cdot I + (2,2426 \times 10^{-6} \cdot I^2 \cdot L)/d^2 - 0,462 \quad (2.1)$$

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

$$MR_{AC} = (MR_{DC(+)} + MR_{DC(-)}) / 2$$

6.Adım. Kullanılabilir maksimum kafa sayısına ve her bir kafadaki kullanılabilir maksimum akım şiddeti değerlerine bağlı olarak, iç ve dış kaynak noktasına iletilebilecek maksimum tel miktarı hesaplanır ve Denklem 4.3 yardımı ile ulaşılabilecek en yüksek kaynak hızı belirlenir. Daha sonra, ulaşılabilecek maksimum kaynak hızı da dikkate alınarak, çalışılmak istenen kaynak hızı (v) belirlenir. Seçilen bu kaynak hızına bağlı olarak iç ve dış kaynakta toplam dolgu kesit alanına bağlı olarak, Denklem 4.3 yardımı ile gereksinim duyulan tel miktarı belirlenir.

$$E = 0,462 \cdot A_d \cdot v \quad (4.3)$$

Tablo 5.1. Tel çapına bağlı olarak çalışılabilir maks. akım şiddeti değerleri.

	Tel çapı	
	3,2 mm	4,0 mm
Gaz boruları	750 A	900 A
Diğer	850 A	1100 A

7.Adım. Bu aşamada, 6.adımda belirlenmiş olan tel miktarını karşılayacak şekilde, sırasıyla kafa sayısı, her bir kafada kullanılacak olan akım şiddeti ve buna bağlı olarak tel çapı ile ark gerilimi belirlenir. İç kaynak 1.kafadaki akım şiddeti belirlenirken malzemenin delinme tehlikesi mutlaka göz önüne alınmalıdır. Bunun dışında, tek kafa kullanımının söz konusu olduğu uygulamalarda yanma oluşu tehlikesine karşı, kaynak akım şiddeti belirlenirken Şekil 2.13 'de ki diyagramın dikkate alınmasında yarar vardır. Y türü kaynak ağzında, kaynak ağzı açılmamış tarafta yani dış kaynak DC kafadaki akım şiddetinin belirlenmesinde ise nufuziyet derinliği mutlaka göz önüne alınmalıdır, bunun içinde Denklem 2.8 'den yararlanılabilir.

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

Elektriksel parametrelerin belirlenmesi aşamasında, malzemeye uygulanacak olan enerji girdisi mutlaka göz önüne alınmalı ve kontrol edilmelidir. Genel olarak, doğal gaz borusu üretiminde ince taneli yüksek mukavemetli X-65 çeliği için minimum ve maksimum enerji girdisi belirlenirken Şekil 2.34 'de verilen diyagram dikkate alınmalıdır. Ayrıca, X-65 çeliği için Şekil 2.31 'de verilen diyagram kaynak metalinin soğuma süresini belirlemek amacı ile kullanılabilir. Bu diyagrama göre, X-65 çeliği için soğuma süresinin alt ve üst sınır değerleri sırasıyla 17 sn ve 186 sn 'dir.

5.1. Tozaltı Kaynak Yöntemi İle Spiral Dikişli Boru Üretiminde Kaynak Parametrelerinin Bilgisayar Programı İle Belirlenmesi.

Yukarıda açıklaması yapılan kaynak parametreleri belirleme yönteminin göz önüne alınması ile tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminden kullanılmak üzere bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu program, üretim öncesi optimum kaynak parametrelerinin seçimine olanak sağlamaktadır. Söz konusu bu programa ait bilgisayar görüntüsü Şekil 5.2 'de verilmiştir.

Şekil 5.2. Kaynak parametrelerinin seçimi için geliştirilen bilgisayar programı

KAYNAK PARAMETRELERİ						864 x 12 mm					
Standart : TS 1997			Y veya X kaynak ağzı ağz açısı : 60 °			iç kaynak			dış kaynak		
kaynak hızı (m/dk) max 3,27	iç kaynak					dış kaynak					
	akım şiddeti (A)	ark gerilimi (V)	tel çapı (mm)	serbest tel uzunluğu (mm)	ergime miktarı 33,4 kg/h	akım şiddeti (A)	ark gerilimi (V)	tel çapı (mm)	serbest tel uzunluğu (mm)	ergime miktarı 24,0 kg/h	
DC +	1050	32	4,0	24	14,1	950	30	4,0		12,6	
1.AC	750	33	3,2	24	12,3	700	31	3,2		11,3	
2.AC	500	34	3,2	24	7,4						
ısı girdisi 840 - 2100	1507 J/mm				t8/5 : 18 sn	1004 J/mm				t8/5 : 117 sn	

Geliştirilen program, sisteme üretilcek olan boru çap değerinin girilmesi ile çalışmaya başlamaktadır. Malzeme kalınlığının da girilmesi ile sistem öncelikle iç kaynakta kullanılabilecek maksimum kaynak kafa sayısını ve açılması gereken kaynak ağzı türünü belirlemektedir. Boru üretim standardının da girilmesi ile hem olası kaynak dikiş geometrisi hem de uygulanabilecek enerji girdisinin alt ve üst sınırları sistem tarafından hesaplanmaktadır. Örneğin, 914x12,5 mm ebatlı bir su borusunun TS 1997 standardına göre üretilmesi durumunda (EK-4), kaynak dikiş genişliği 13,28 mm, kaynak dikiş nüfuziyet derinliği 6,88 mm ve dikiş yüksekliği 1,63 mm olarak hesaplanmıştır. Üretim standardının TS 1997 yerine API 5L olarak değiştirilmesi durumunda ise dikiş genişliği 14,17 mm ve nüfuziyet derinliği 7,50 mm olarak değişmektedir (EK-5).

Bir sonraki aşamada, kaynak ağzı türünün ve ağız açısının seçilmesi ile birlikte sistem ulaşılabilecek en yüksek kaynak hızını belirlemektedir. EK-5 'de ki örnek uygulama için, Y türü kaynak ağzının seçilmesi ve yine kaynak ağız açısının 60° olarak belirlenmesi durumunda ulaşılabilecek maksimum kaynak hızının 2,05

m/dk olduğu gör÷lmektedir (EK-6). Daha sonra, çalışılmak istenen kaynak hız değerinin girilmesi ile birlikte, sistem iç kaynak için birim zamanda gereksinim duyulan kaynak tel miktarını hesaplamaktadır. Yapılan rnek çalışmada, kaynak hızınının 2,00 m/dk olarak seçilmesi durumunda gereksinim duyulan tel miktarınının 28,9 kg/h olduğu gör÷lmektedir (EK-7). Kaynak hızınının 1,80 m/dk değerine dñřür÷lmesi ile kaynak tel ihtiyacı da 26,0 kg/h değerine dñřmektedir (EK-8). Bu durumda, kaynak ağız açısının değiştirilmesi ile birlikte ulaşılabilecek maksimum kaynak hız değeri ile gereksinim duyulan tel miktarı da değişecektir (EK-9).

Bundan sonraki aşamada, kaynak akım şiddeti, ark gerilimi, tel çapı ve serbest tel uzunluğu gibi elektriksel kaynak parametreleri belirlenir. Çalışılmak istenen akım şiddeti değerinin girilmesi ile sistem ark gerilimini, kaynak tel çapını ve bu koşullar altında ergiyen tel miktarını hesaplar (EK-10). Sistem, ergiyen tel miktarınının hesaplanması sırasında, aksi bir değer girilmezse, serbest tel uzunluğunu 25 mm olarak kabul eder. Serbest tel uzunluğunun değiştirilmesi ile birlikte ergiyen tel miktarı da değişir (EK-11). Elektriksel parametrelerin bu şekilde belirlenmesi işlemi, toplam ergiyen tel miktarınının gereksinim duyulan tel miktarına eşitlenmesi durumunda tamamlanır. Sistem bu arada, seçilen elektriksel parametrelere bağlı olarak enerji girdisini ve soğuma süresini sürekli olarak hesaplayarak kontrol etmektedir. Enerji girdisinin ve soğuma süresinin ngör÷len sınır değerlerin dışına çıkması halinde gerekli uyarıları vermektedir. Benzer kontrol işlemi, akım şiddeti sınır değerleri ve tel ergime miktarları için de söz konusudur. Ayrıca, sistem kullanılan kafa sayısına bağlı olarak kafa eğim açılarını da vermektedir (EK-12).

Dış kaynağa ait elektriksel parametrelerde benzer şekilde belirlenir. Ancak, burada iç kaynaktan farklı olarak dış kaynak noktasının yerinin soğuma süresi üzerindeki etkisi de kontrol edilmektedir. Dış kaynak noktasının i kaynaktan 1/2 hatve ileride olduğu durumda soğuma süresi 126 sn iken (EK-13), dış kaynak noktasının 11/2 hatve ileriye alınması ile soğuma süresi 19 sn 'ye dñřmektedir (EK-14).

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

“Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral boru üretiminde kaynak parametrelerinin kaynak dikiş kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi” adı altında yapılan bu çalışmada, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Yapılan deneysel çalışmalar, iyi bir kaynak dikişinin elde edilebilmesi ve yüksek kaynak hızlarına çıkılması için, kaynak hızı, iletilen toplam akım miktarı, kullanılan kafa sayısı, her bir kafaya yüklenen akım miktarı ile akımın DC ve AC kafalardaki dağılımı arasında uygun bir dengenin kurulması gerektiğini göstermiştir. Söz konusu bu dengenin kurulabilmesi için öncelikle malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilecek olan dikiş geometrisinin öngörülebilmesi ve kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak noktasına iletilecek olan tel miktarının belirlenebilmesi gereklidir.

2. Endüstriyel uygulamalarda gerek verimliliğin artması gerekse maliyetlerin düşürülmesi açısından kaynak hızı son derece önemlidir. Yapılan deneysel çalışmalarda, kaynak dikişinde herhangi bir X-ray kontrolünün öngörülmediği su iletim hat boruları ve kazık borularında yüksek üretim hızlarına çıkılabileceği saptanmıştır. 1016x9,8 mm ebatlı su iletim borusunda 3.00 m/dk ve yine benzer şekilde 1016x17,7 mm ebadında ki kazık borusunda ise 1,80 m/dk gibi spiral dikişli boru üretimi için oldukça yüksek sayılabilecek kaynak hızları ile çalışılmıştır. Doğal gaz iletim hat borularının üretiminde ise 2.20 m/dk kaynak hızlarına çıkılabileceği görülmüştür.

3. Yapılan deneysel çalışmalar, kaynak kep biçiminin bir daire parçası olarak düşünülmesi halinde, malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak dikişine ait bazı temel geometrik büyüklüklerin, aşağıda verilen formüller yardımı önceden kolaylıkla hesaplanabileceği göstermiştir. Burada, h kaynak dikişinin yüksekliğini,

s kaynak dikişinin genişliğini, A kaynak kepinin kesit alanını ve r ise daire parçasının yarıçapını ifade etmektedir. Söz konusu formüller yardımıyla, kaynak kep alanının belirlenmesine yönelik olarak elde edilen teorik değerlerin gerçek ölçüm değerleri ile kıyaslanması sonucunda elde edilen maksimum sapma %6.3 olmuştur. Ayrıca, kaynak dikişi genişlik/derinlik oranının sıcak çatlak oluşumu açısından güvenli bölgede olduğu görülmüştür.

$$A = [(h / 12s).(3 h^2 + 4 s^2)] + (0,25 . S . h . \pi)$$

$$r = (h / 2) + (s^2 / 8h)$$

$$h = 1 + (0,05 . t)$$

$$r = 1,30 . t$$

4. Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak noktasına iletilebilecek tel miktarının R.S.Chandel (1996) tarafından geliştirilmiş olan formüller yardımı ile hesaplanabileceği saptanmıştır. Burada, MR tel ergime miktarını, I kaynak akımını (A), L serbest tel uzunluğunu (mm) ve d ise tel çapını (mm) ifade etmektedir. Chandel tarafından geliştirilmiş olan tel ergime formüllerinin gerçek ergime değerleri ile kıyasladığı deneysel çalışmalarda, en büyük sapmanın %8 olduğu görülmüştür. Spiral dikişli boru üretiminde, kaynak banyosunun %25 oranında ergimiş kaynak telinden oluştuğu düşünülürse, söz konusu bu %8 oranındaki sapma tüm kaynak dikiş kesitinde %2 düzeyinde bir hataya yol açmaktadır. Bu hata oranı ise kaynak öncesi yapılacak olan kaynak tasarım çalışmalarının da herhangi bir problem yaratmayacak düzeydedir.

$$MR_{DC(+)} = 0.010371 . I + (2,2426 \times 10^{-6} . I^2 . L) / d^2 - 0,462$$

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

$$MR_{AC} = (MR_{DC(+)} + MR_{DC(-)}) / 2$$

5. Yapılan deneysel çalışmalarda, S2Mo tel yerine daha yüksek Mn içerikli S3Mo tel kullanımı sonucunda, kaynak dikişindeki Mn miktarının artması ile kaynak dikişinin çentik darbe mukavemetinde artış olduğu görülmüştür. Mn artışının

yanında kaynak metalindeki Ti miktarının artması, tokluk özelliklerini daha da iyileştirmiştir. Tokluğu düşürücü yönde etkisi olan zararlı elementler grubundaki serbest oksijen ve azotu TiO ve TiN olarak bağlayan Titanyumun, kaynak metalindeki miktarsal artışı ile çentik darbe deney sonuçları daha homojen bir duruma gelmiştir.

6. Soğuma süresinin azalması yani hızlı soğuma ile birlikte kaynak dikişinin tokluk özelliklerin de iyileşme olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, dış kaynak soğuma süresi 209 sn iken çentik darbe tokluğunun 62 J olduğu, soğuma süresinin 29 sn 'ye düşmesi ile birlikte çentik darbe mukavemetinin 73 J 'e yükseldiği saptanmıştır. Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, dış kaynak noktasının yerinin değiştirilmesi ile kaynak öncesi metal sıcaklığını ve dolayısıyla da dış kaynağın soğuma süresini kontrol etme olanağının olduğu yapılan deneysel çalışmalarla ispatlanmıştır.

7. Dış kaynak sonrası, iç kaynak dikişinin ısı çevrim altında kalan belirli bir bölgesinde oldukça iri taneli bir bölge oluşmaktadır. Yapı özellikleri nedeni ile kaynak dikişinin en zayıf yeri olan bu bölgenin kaynak dikişinin tokluk özelliklerini de zayıflattığı saptanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, yaklaşık olarak %20 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Bu bölgenin, tokluk açısından yaratacağı olumsuz etkileri en aza indirmek için, dış kaynak sonrası ısı çevrim altında kalan bu bölgenin sınırlandırılması gerekir. Bunun sağlanması için dış kaynak noktasının yerinin değiştirilmesi ile dış kaynak öncesi, iç kaynak bölgesinin sıcaklığı olabildiğince düşük tutulmalıdır.

8. Yapılmış olan deneysel çalışmalardan da yararlanarak, tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde, olabilen en yüksek kaynak hızlarında yüksek kalite özelliklerinin elde edilmesine olanak sağlayacak şekilde, üretim öncesi kaynak tasarımına yönelik olarak yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yöntemi ana hatları ile malzeme kalınlığı ve üretim standardına göre elde edilmek istenen kaynak dikişinin geometrik boyutlarının öngörülmesi, daha sonra bu dikişi elde

edebilmek için gereksinim duyulan tel miktarının belirlenmesi ve bu belirlenen telin kaynak noktasına iletilmesi şeklinde özetleme olanağı vardır.

9. Geliştirilen kaynak tasarım yöntemi yardımı ile tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminden kullanılmak üzere bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu program, üretim öncesi optimum kaynak parametrelerinin seçimine olanak sağlamaktadır.

EK-1. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaynak tozuna ait üretici firma sertifikası

Lincoln Electric France
 BP 213 - av. L. Brossier 76121 Le Grand-Couronné Cedex (France)
 Téléphone : (33) 21 41 41 41 Fax : (33) 21 41 41 41
 Plans International : (33) 21 41 41 41 Télécopieur : (33) 21 41 41 41

INSPECTION CERTIFICATE / CERTIFICAT DE RÉCEPTION
 According to / selon : EN 10204 **3.1.B**

Product / Produit : **P223**
 Classification : **AWS A5.17/23 ASME SPA-5.17/23**
F8.A4-EA1-A2 & F8.A4-EA2-A2
F7A4.EM12K
EN 760 : A A11 55 AC H5 2-20

Dir. Flux : **F1FX30014**
 Lot No

Comm. Order No :
 N° Cde Client : **24/8863**
 LEF Réf.

Customer / Client : **KAYNAK TEKNIGI SAN.VE**

Chemical composition % / Analyse chimique

I : Weld deposit / Métal Déposé
 II : Wire / Fil

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co
I	0,070	0,44	1,41	0,018	<0,010					
II	0,100	0,18	1,01	0,012	<0,010					
	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Sb	B
I										
II										

Mechanical tests / Caractéristiques Mécaniques

Test N° :

Tension test / Essai de traction

Charpy V - notch test / Essai de résilience

Cond.	Weld temp. (°C)	Yield % (N/mm ²)	ELI (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A ₅ (%)	Test Temp. (°C)	CVN min. values (J)	CVN max. (J)

Flux composition (w %) :

Mu	Zr	Mg	Ni	Fe	Mn	Cr	V	Ti	Ca	Si	K	Al

Additional information / Informations complémentaires

Date
30/01/03

Applications Dépt.

QA Dept.
JLEBRETO

Shipping Dept.
MPERREI

Cont. No
030056-001

FC 003 CRW 9

EK-2

PROCEDURE QUALIFICATION RECORD

PIPE DIMENSION: 969,0 mm O.D. x 27,20 mm W.T.

GRADE OF STEEL: X 65, PSL 2 (sour)

EP-Order-No.: 611/1342.8 Item 10, P.O. Item No. 1

PRODUCT :	LONGITUDINAL DOUBLE SUBMERGED ARC WELDED STEEL LINE PIPES
DIMENSION :	969,0 mm O.D. x 27,20 mm W.T.
GRADE OF STEEL :	X 65, PSL 2 (sour)
MANUFACTURER :	EUROPIPE GmbH Formerstr. 49 40 878 Ratingen
PIPE MILL :	EUROPIPE GmbH Works Mülheim Wiesenstr. 36 45 473 Mülheim a.d. Ruhr
MAN. - ORDER-NO. :	611/1342.8 Item 10
TRADING HOUSE :	Thyssen Krupp Stahlunion GmbH Hans-Günther-Sohl-Str. 1 40 235 Düsseldorf
TRADING HOUSE O.-NO. :	2000010149
CUSTOMER :	J-Ray McDermott Middle East Inc. Jebel Ali, Dubai United Arab Emirates
CUSTOMERS P.O. NO. :	0923-D4777-DD128565-A
SPECIFICATION :	<ul style="list-style-type: none">• API Spec. 5 L, 42nd edition July 1, 2000

EK-2

PROCEDURE QUALIFICATION RECORD

PIPE DIMENSION: 969,0 mm O.D. x 27,20 mm W.T.

GRADE OF STEEL: X 65, PSL 2 (sour)

EP-Order-No.: 611/1342.8 Item 10, P.O. Item No. 1

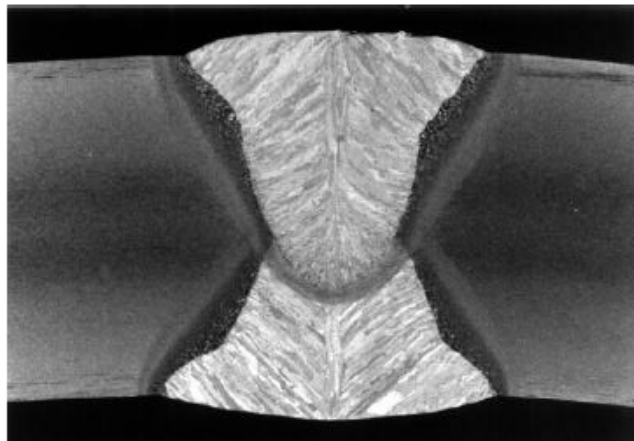
TEST RESULTS

WELD MATERIAL

PIPE PRODUCTION-NO.: 96473.1 HEAT-NO.: 29934


2.5.3 MACRO WELDCONFIGURATION (3)

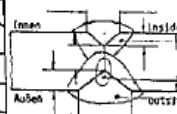
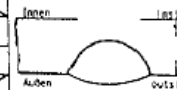
Weld bead height (outside)	2,0 mm
Weld bead height (inside)	2,2 mm
Misalignment	0,3 mm
Offset of Plate Edges	0,5 mm




HNO3 (2 : 1)

EK-2

		Schweißplan-Nr.: _____ Rohr-Nr.: _____ Material: 964731		LP-Einsatz: _____ SM-Inside wach: 13		Altes Stück: _____ Dimensions: 369,0x127,0x12,500					
Auftrag-Nr.: A1342 Pk. 10		Schweißer: _____ Material: _____		LP-Außen: _____ SM-Outside wach: 18		Werkstoff: _____ Last Metall: _____					
		LP-Längsnahtschweißung SW-Längsnaht weld					MIG-Gefüge GMA-Tack welding				
		② Innen/inside					③ Außen/outside				
Schweißdaten Characteristics		1	2	3	4	1	2	3	4	5	
Drahtabstand spacing of electr.				18	10				16	14	14
El.-Länge electrode			33	34	34	35	36	36	36	25	
Kopfstellung(*) inclination of el.			15°	3°	14°	17°	3°	-15°	-25°	5°	
Draht-Typ filler			53	53	53	53	53	53	53	53	
Draht-Ø filler Ø (mm)			4	4	4	5	4	4	4	4	
Chp.			32059	12414	27914	50142	50142	50142	50142	50142	
Ampere (A)			1070	1070	750	1270	900	750	600		
Volt (V)			34	40	38	29	30	38	40		
vs (cm/min.) welding speed			100			120			54		
VE heat input			1cm	1cm	1cm	1cm	1cm	1cm	1cm		
Drahtleistung height of wire			1	1	1	1	1	1	1		
Lippenzahl or of rakes			1				1				
Pulver flux											
Schutzgas shielding gas											
Schweißaufsicht: Supervisor: S. Kefauz		Bemerkungen remarks									
Datum: date: 15.5.02		Schweiß- stift: 2									

SCHWEIßPROTOKOLL		welding procedure record	
		A	B
		Innen/inside	Außen/outside
Vorbereitung Schweißnaht joint detail		Querschnitt microsection	
		② Mr. V. Emmenes ① Mr. Bogdanak 1/6 3 ③ Mr. Golombek	
Vorbereitung ausgefülltes Rohr joint detail of gapped out pipe			
			
		A	B
		Außen/outside	Innen/inside
Prüfergebnisse Querschnitt test result microsection		Allgemeines general	
Versatz der Schweißnaht (Innen/Außen) offset of seam (inside/outside) (mm)			
Versatz der Bleekanten offset of plate edges (mm)			
Maßnahme direct thickness (mm)			1,8
Maßnahme weld gap (mm)			2,2
Einbrandzahl (von der Bleckdicke) penetration (of plate thickness)			27
Same Einbrandzahl penetration rate			24
Maßfugenwinkel (°) angle of weld face (°)			

EK-3. 1067x17,48 mm ebatlı boruya ait kaynak prosedürü

	QA/QC-INSTRUCTION Nr. 43045 / 18m line Welding procedure specif. SAW Based on A.S.M.E. section IX	Customer: SALZGITTER INTERNATIONAL G Project: Crude Oil Pipeline Baku-Ceyhan Inquiry-No.: 200604
	ORDER Revision: 0 Revision Date: 25.09.2002	Order-No.: 611/1522.6 / 70 Outs. Diam.: 1067,0 mm Inside Diam.: 1032,0 mm Wallthickn.: 17,48 mm
Customer Spec: API 5L, 07/2000 Grade: X 65, PSL2		Page: 1 / 5

1) GENERAL INFORMATION

- Internal Identification no.:
- Supporting procedure qualification record
- Welding process: submerged arc welding (S.A.W) and gas metal arc welding (G.M.A.W)
- Type: automatic

PQR No.:		Date:		Rev.:	
-----------------	--	--------------	--	--------------	--

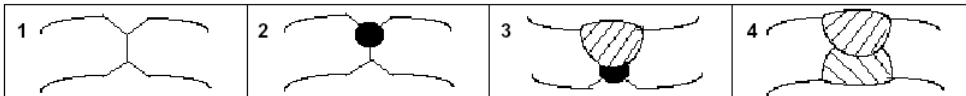
2) BASE METAL CHARACTERISTICS (QW-403)

P No.:		Group No.:	
---------------	--	-------------------	--

- Foreseen product chemical analysis (%) for information (max):
See QA/QC Instruction "CHEMICAL PROPERTIES AND TESTS"

3) EDGES PREPARATION (QW-402)

- Edge bevel on automatic machine with cut tools (1)
- Tack welding - GMAW (2)
- Backing: n. a.
- Inside and outside welding - SAW (3 and 4)



4) WELDING POSITION (QW-405)

- Bevel position: 1G
- Welding progression: right in a horizontal plan

5) PRE-HEATING (QW-406)

TACK WELDING (°C)	INTERNAL WELDING (°C)	EXTERNAL WELDING (°C)


6) POST WELD HEAT TREATMENT(QW-407)

Temperature (°C)	Duration (hours)

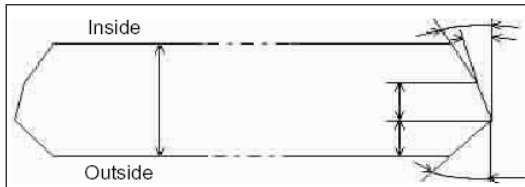
7) TECHNIQUE

- Pass typ: stringed
- Pass no.I: GMAW - single pass, SAW - single pass per side
- Gas cup size: GMAW: 15 - 50 mm
- Interpass cleaning: brushing or grinding if necessary
- Tube to work distance: 15 - 35 mm
- Oscillation: n. a.
- Peening: n. a.
- Method at back gouging: n. a.

EK-3

 EUROPIPE	QA/QC-INSTRUCTION Nr. 43045 / 18m line Welding procedure specif. SAW Based on A.S.M.E. section IX	Customer: SALZGITTER INTERNATIONAL G Project: Crude Oil Pipeline Baku-Ceyhan Inquiry-No.: 200604
	ORDER Revision: 0 Revision Date: 25.09.2002	Order-No.: 611/1522.6 / 70 Outs. Diam.: 1067,0 mm Inside Diam.: 1032,0 mm Wallthickn.: 17,48 mm
Customer Spec: API 5L, 07/2000 Grade: X 65, PSL2		Page: 2 / 5

8) EDGES PREPARATION (QW-402)



	(°)	(°)	(°)	a	b
	45	40	0	7,5	6,5
Tol. min	5	5	2	1,0	1,0
Tol. max	5	5	2	1,0	1,0

w (aimed wall thickness): 17,480 mm

9) WELDING COSUMABLES (QW-404)


Flux trade name	AWS/SFA Specific.	Wire trade name	AWS/SFA Specific.	Classification	F-No./ A-No.
OP 132		S3 TiB	5.23	EG	6 / 1
		S3 Mo TiB	5.23	EG	/ 2
		G4 Si 1	5.18	ER70S6	6 /

10) TACK WELDING (QW-409)

Circumference 3316 mm Ruler measure 272 mm

		Tack seam revision	Tol.	
			-	+
Wire	-	G4 Si 1		
Wire diameter	mm	1,2		
Current	A	320	35	35
Voltage	V	28	3	3
Gas		15,0 % CO ₂ 85,0 % Ar		

EK-3


 EUROPIPE	QA/QC-INSTRUCTION Nr. 43045 / 18m line Welding procedure specif. SAW Based on A.S.M.E. section IX	Customer: SALZGITTER INTERNATIONAL G Project: Crude Oil Pipeline Baku-Ceyhan Inquiry-No.: 200604
	ORDER Revision: 0 Revision Date: 25.09.2002	Order-No.: 611/1522.6 / 70 Outs. Diam.: 1067,0 mm Inside Diam.: 1032,0 mm Wallthickn.: 17,48 mm
Customer Spec: API 5L, 07/2000 Grade: X 65, PSL2		Page: 4 / 5

11) SUBMERGED-ARC WELDING (QW-409)

		Welding inside					Tol.	
		1	2	3	4	5	-	+
Flux trade	-		OP 132					
Wire trade	-		S3 TiB	S3 TiB	S3 TiB			
Wire diameter	mm		4,0	4,0	4,0			
Polarity	-		AC	AC	AC			
Voltage	V		33	40	36	3	3	
Current	A		950	950	700	10,00 %	10,00 %	
Speed	cm/min		150			15	15	
Reinforcement inside	mm	min.		max.	3,5			
Energy	kJ/cm	37,820		E/w:	2,164			
Angle	°		12,0	-4,0	-15,0	3,0	3,0	
Space between wire	mm			12	16	4	4	
Stick out	mm		29	29	30	3	3	

		Welding outside					Tol.	
		1	2	3	4	5	-	+
Flux trade	-		OP 132					
Wire trade	-	S3 Mo TiB	S3 Mo TiB	S3 Mo TiB	S3 Mo TiB			
Wire diameter	mm	5,0	4,0	4,0	4,0			
Polarity	-	DC(+)	AC	AC	AC			
Voltage	V	29	35	38	40	3	3	
Current	A	1100	900	750	650	10,00 %	10,00 %	
Speed	cm/min		180			18	18	
Reinforcement outside	mm	min.		max.	4,0			
Energy	kJ/cm	39,300		E/w:	2,248			
Angle	°	12,0	3,0	-15,0	-28,0	3,0	3,0	
Space between wire	mm		16	18	15	4	4	
Stick out	mm	29	29	29	30	3	3	

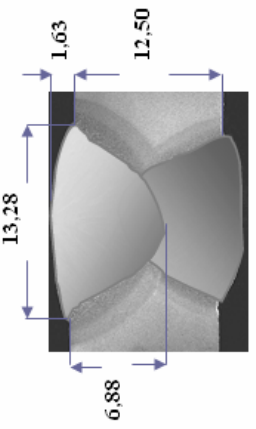
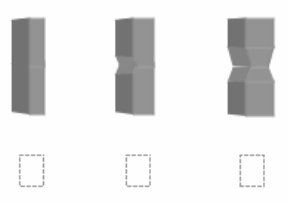
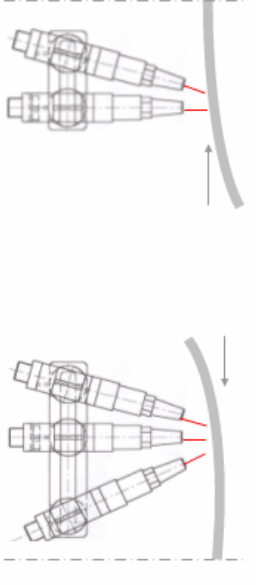

EK-3

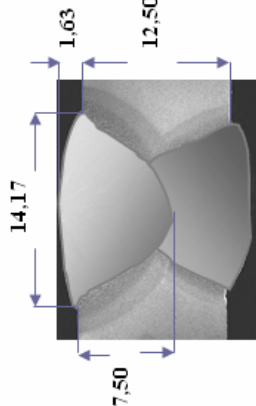
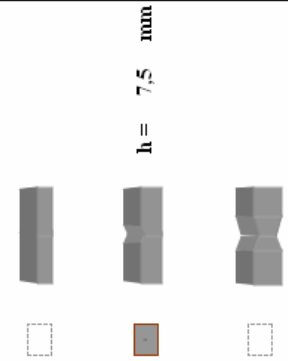
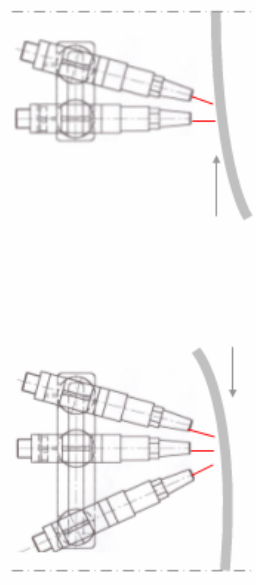






	QA/QC-INSTRUCTION Nr. 43045 / 18m line Welding procedure specif. SAW Based on A.S.M.E. section IX	Customer: SALZGITTER INTERNATIONAL G Project: Crude Oil Pipeline Baku-Ceyhan Inquiry-No.: 200604
	ORDER Revision: 0 Revision Date: 25.09.2002	Order-No.: 611/1522.6 / 70 Outs. Diam.: 1067,0 mm Inside Diam.: 1032,0 mm Wallthickn.: 17,48 mm
Customer Spec: API 5L, 07/2000 Grade: X 65, PSL2		Page: 5 / 5

		Innenschweißen 4-Draht					Tol.	
		1	2	3	4	5	-	+
Flux trade	-		OP 132					
Wire trade	-	S3 TiB	S3 TiB	S3 TiB	S3 TiB			
Wire diameter	mm	4,0	4,0	4,0	4,0			
Polarity	-	DC(+)	AC	AC	AC			
Voltage	V	32	35	38	40	3	3	
Current	A	1050	900	850	700	10,00 %	10,00 %	
Speed	cm/min		195			19	19	
Reinforcement inside	mm	min.		max.	3,5			
Energy	kJ/cm	38,585		E/w:	2,207			
Angle	°	15,0	3,0	-8,0	-18,0	3,0	3,0	
Space between wire	mm		15	17	15	4	4	
Stick out	mm	28	29	30	30	3	3	

Prepared: ANDRSCHA

Confidential: EUROPIPE property, to be used only for the purpose of qualification or specific commercial business between your COMPANY and EUROPIPE.

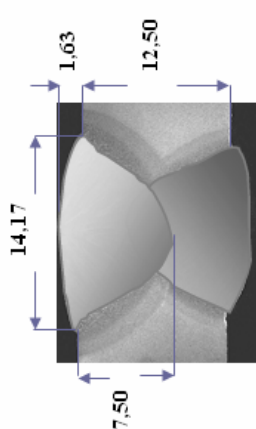
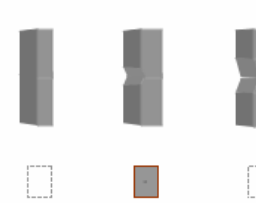
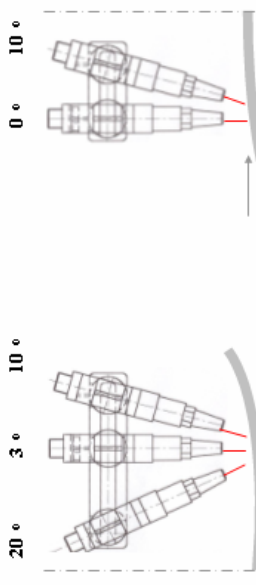
KAYNAK PARAMETRELERİ		914 x 12,5 mm
<p>Standart : TS 1997</p> 	<p>Y veya X kaynak ağız ağız açısı :</p> 	
DC +	1.AC	2.AC
ısı girişi 875 - 2188		

KAYNAK PARAMETRELERİ		914 x 12,5 mm					
Standart : API SL		<p>Y veya X kaynak ağızı</p> <p>ağız açısı : 60 °</p> <p>h = 7,5 mm</p> 					
kaynak uzunluğu (m/dk) max 2,05	iç kaynak						
DC +	akım şiddeti (A)	ark gerilimi (V)	tel çapı (mm)	serbest tel uzunluğu (mm)	eğime miktarı 28,9 kg/h		
1.AC	2,00						
2.AC							
ısı girişi 875 - 2188							

KAYNAK PARAMETRELERİ										914 x 12,5 mm		
Standart : API 5L			Y veya X kaynak ağız ağız açısı : 70 ° h = 7,5 mm			iç kaynak DC+ 3 °						
kaynak luzı (m/dk) max 1,87	iç kaynak					akım şiddeti (A)	ark gerilimi (V)	tel çapı (mm)	serbest tel uzunluğu (mm)	eğime miktarı	39,1%	
	DC +	1.AC	2.AC	900	29							
ısı girişi 875 - 2188	870	J/mm	t8/5 : 5	sn								

Standart : API 5L		Y veya X kaynak ağız ağız açısı : 70 ° h = 7,5 mm		iç kaynak		914 x 12,5 mm								
kaynak uzunluğu (m/dk) max 1,87		iç kaynak						dış kaynak						
		akım şiddeti (A)	ark gerilimi (V)	tel çapı (mm)	serbest tel uzunluğu (mm)	erğine miktarı 28,5 kg/h		akım şiddeti (A)	ark gerilimi (V)	tel çapı (mm)	serbest tel uzunluğu (mm)	erğine miktarı 16,1 kg/h		
DC +		900	29	4,0	20	11,1								
1.AC	1,80	700	30	3,2	22	11,0								
2.AC		450	31	3,2	24	6,4								11/2
ısı girişi 875 - 2188		2035 J/mm		t8/5 : 29 sn										

KAYNAK PARAMETRELERİ										
Standart : API 5L					914 x 12,5 mm					
			<p>Y veya X kaynak ağız ağız açısı : 70 °</p>			<p>iç kaynak</p> <p>2.AC 20 ° 1.AC 3 ° DC+ 10 °</p>		<p>dış kaynak</p> <p>DC 0 ° 1.AC 10 °</p>		
kaynak luzı (m/dk) max 1,87	iç kaynak						dış kaynak			
	akım şiddeti (A)	ark gerilimi (V)	tel çapı (mm)	serbest tel uzunluğu (mm)	ergine miktarı 28,5 kg/h	akım şiddeti (A)	ark gerilimi (V)	tel çapı (mm)	serbest tel uzunluğu (mm)	ergine miktarı 16,1 kg/h
DC +	900	29	4,0	20	11,1	700	28	3,2		9,5
1.AC	700	30	3,2	22	11,0	450	29	3,2		6,5
2.AC	450	31	3,2	24	6,4					1/2
ısı girdisi 875 - 2188	2035 J/mm		t8/5 : 29 sn		1088 J/mm		t8/5 : 126 sn			

Standart : API 5L		Y veya X kaynak ağızı		914 x 12,5 mm				
		Y veya X kaynak ağızı ağız açısı : 70 ° h = 7,5 mm	2.AC 20 ° 1.AC 3 ° DC+ 10 °	2.AC 20 ° 1.AC 3 ° DC 0 ° 1.AC 10 °	iç kaynak / dış kaynak			
								
KAYNAK PARAMETRELERİ		914 x 12,5 mm						
		iç kaynak						
		dış kaynak						
kaynak uzunluğu (m/dk) max 1,87		akım şiddeti (A)	ark gerilimi (V)	tel çapı (mm)	serbest tel uzunluğu (mm)	ergine miktarı 16,1 kg/h		
DC +		900	29	4,0	20	11,1	9,5	
1.AC	1,80	700	30	3,2	22	11,0	6,5	
2.AC		450	31	3,2	24	6,4		
ısı girişi 875 - 2188		2035 J/mm		t8/5 : 29 sn		1088 J/mm		t8/5 : 19 sn

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTAMALAR

I	: Kaynak akımı
L	: Serbest tel uzunluğu
d	: Tel çapı
A	: Ergime kesit alanı
S	: Kaynak hızı
P	: Ark gerilimi (voltaj)
H_{net}	: Net ısı girdisi
H_f	: Ergime ısısı
C	: Spesifik ısı
T_m	: Ana metal ergime sıcaklığı
T_o	: Ana metal başlangıç sıcaklığı
f_2	: Ergime etkinlik katsayısı
f_1	: Ark verimi
T_p	: Tepe sıcaklık derecesi
Y	: Ergime sınırına uzaklık
t	: Malzeme kalınlığı
F_2, F_3	: Dikiş faktörü
$t_{8/5}$: Soğuma süresi
d_g	: Geçiş kalınlığı
R_{c2}	: İki boyutlu ısı iletiminde soğuma hızı
R_{c3}	: Üç boyutlu ısı iletiminde soğuma hızı
T_c	: Soğuma hızının hesaplandığı sıcaklık
$C_{eş}$: Karbon eşdeğeri
CE_{PLS}	: Pipeline çelikleri için karbon eşdeğeri
A_d	: Toplam dolgu kesit alanı
A_1	: Kaynak ağzı kesit alanı
A_2	: Kaynak kepi kesit alanı
v	: Kaynak hızı
E	: Kaynak bölgesine yığılan tel miktarı
h	: Kaynak kep yüksekliği
s	: Kaynak genişliği
r	: Daire parçası yarıçapı

η : Bağıl termik verimlilik
 γ : Kaynak metali yoğunluğu
 MR_{DC+} : DC(+) akım türünde ergiyen tel miktarı
 MR_{DC-} : DC(-) akım türünde ergiyen tel miktarı
 MR_{AC} : AC akım türünde ergiyen tel miktarı
IEO : The International Energy Outlook
BTC : Bakü-Tiflis-Ceyhan
HIC : Hydrogen Induced Cracking
HSLA : High Strength Low Alloyed
MS : Mangan-silikat
CS : Kalsiyum-silikat
ZS : Zirkonyum-silikat
RS : Rutil-silikat
AR : Alumina-rutil
AB : Alumina-bazik
AS : Alumina-silikat
AF : Alumina-florit-bazik
FB : Florit-bazik
Z : Herhangi bir bileşim
AWS : American Welding Society
EN : Euronorm
IEB : Isıdan etkilenmiş bölge
IIW : Uluslararası Kaynak Enstitüsü
 ΔT_G : Malzeme tokluk geçiş sıcaklığı
NACE : The National Association of Corrosion Engineers
AF : Acicular ferrite (iğnemsî ferrit)
N : Nötr derecesi
B : Baziklik ölçęęi
DC : Doğru akım
AC : Alternatif akım
API : American Petroleum Institute

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Tozaltı kaynak yönteminin şematik görünümü (Anık 1991b)	9
Şekil 2.2.	a) Düşey karakteristik (örtülü elektrot ile ark kaynağı, TIG kaynağı) b) Yatay karakteristik (MIG/MAG kaynağı için) (Tülbentçi ve Kaluç 1997a)	13
Şekil 2.3.	Tozaltı kaynağında kullanılan bazı kaynak ağız biçimleri (Anık 1991a)	17
Şekil 2.4.	Tozaltı kaynak yönteminde kaynak ağızı ile dolgu miktarı arasındaki ilişki (Lincoln Electric 2000)	18
Şekil 2.5.	Tozaltı kaynağında ark geriliminin gösterimi (Lincoln Electric 2000)	21
Şekil 2.6.	Kaynak hızının kaynak banyo biçimi üzerindeki etkisi (Linnert 1994)	23
Şekil 2.7.	Tozaltı kaynağında kaynak akımı ve kaynak hızının ergime kesit alanı üzerindeki etkisi (Linnert 1994)	24
Şekil 2.8.	Kaynak akımı, kaynak hızı ve ergime kesit alanı arasındaki ilişki (ASM Handbook Committee 1983)	24
Şekil 2.9.	Kaynak akımı, kaynak hızı ve ark geriliminin nufuziyet derinliğine etkisi (ASM Handbook Committee 1983)	25
Şekil 2.10.	Kaynak hızı, kaynak akımı ve yanma oluşu arasındaki ilişki (ASM Handbook Committee 1983)	25
Şekil 2.11.	Elektrot eğiminin kaynak dikiş biçimi üzerindeki etkisi	26
Şekil 2.12.	Kaynak düzleminin kaynak biçimi üzerindeki etkisi (Tülbentçi 1998)	27
Şekil 2.13.	Spiral dikişli boru üretiminde kaynak kafalarının yerleşimi	29
Şekil 2.14.	EN 760 standardına göre kaynak tozlarının gösterimi	38
Şekil 2.15.	EN 756 standardına göre kaynak tellerinin gösterimi	43
Şekil 2.16.	Kaynak sırasında kaynak bölgesinde oluşan mikro yapısal değişimler	44
Şekil 2.17.	Erime bölgesindeki tanelerin durumu	46
Şekil 2.18.	a) Kaynak bölgesindeki ısınma eğrisi (Linnert 1994) b) IEB bölgesindeki ısı yayılımı (Linnert 1994)	48
Şekil 2.19.	a) Üç boyutlu ısı iletimi (kalın parça) b) İki boyutlu ısı iletimi (ince parça)	54
Şekil 2.20.	Kalınlık, ısı girdisi ve soğuma süresi arasındaki ilişki (Linnert 1994)	55
Şekil 2.21.	Nufuziyet yetersizliği	59
Şekil 2.22.	Yanma oluşu	60
Şekil 2.23.	Gözenek türü kaynak hataları (Güloğlu 2003)	61
Şekil 2.24.	Kalıntı türü hatanın oluşumu	62
Şekil 2.25.	Kalıntı türü kaynak hatasının görünümü	62
Şekil 2.26.	Kaynak metalinde oluşan sıcak çatlak hatası (Hulka et al 1993)	63
Şekil 2.27.	Çentik vurma işinin sıcaklıkla değişimi	68
Şekil 2.28.	İşlerlik ile dikiş kaçıklığı arasındaki ilişki	69
Şekil 2.29.	Karbonun tokluk üzerindeki etkisi (Hulka et al 1993)	72
Şekil 2.30.	Tane küçülmesinin çelik özellikleri üzerindeki etkisi (Denizkuşu 2001)	78
Şekil 2.31.	HSLA çeliği kaynak metalinin soğuma eğrisi (ASM Handbook Com. 1983)	84
Şekil 2.32.	Kaynak metalindeki azotun tokluk üzerindeki etkisi (Graf 2000)	84
Şekil 2.33.	Kaynak metalinde iğnemsî ferrit (AF) oluşumu (Hulka 2001)	85
Şekil 2.34.	StE 460 çeliğinin kaynağında kalınlık ile enerji girdisi arasındaki ilişki (Tülbentçi ve Kaluç 2001)	86
Şekil 2.35.	C, Nb ve B 'un IEB bölgesi tokluk özelliklerine etkisi (Peters 1998)	87
Şekil 2.36.	Titanyumun IEB bölgesinin tokluk özelliklerine etkisi (Peters 1998)	88

Şekil 2.37.	IEB bölgesinin tokluk özellikleri üzerine Nb ‘un etkisi (Peters 1998)	88
Şekil 2.38.	Spiral dikişli kaynak makinası açılı ayarı	89
Şekil 2.39.	Spiral dikişli boru makinasında banda silindirik biçim verme	91
Şekil 2.40.	Biçim (form) verme ünitesi (deveboynu)	92
Şekil 2.41.	Spiral dikişli boru üretiminde kaynak dikişinin oluşumu	92
Şekil 2.42.	Spiral dikişli boru üretim makinasının değişik aşamaları	93
Şekil 2.43.	Spiral dikişli boru üretim makinasının şematik gösterimi	94
Şekil 2.44.	Boyuna dikişli borularda iç kaynağın oluşumu (Nies et al 1996)	96
Şekil 2.45.	Dış kaynak istasyonu görünümü (Nies et al 1996)	96
Şekil 2.46.	Tozaltı kaynak yöntemi ile boyuna dikişli gaz borusu üretim aşamaları	97
Şekil 3.1.	Kaynak dikiş geometrisine ait büyüklükler	100
Şekil 3.2.	Ölçekli kaynak görüntüsü	102
Şekil 4.1.	Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 1)	105
Şekil 4.2.	Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 2)	106
Şekil 4.3.	Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 3)	107
Şekil 4.4.	1016x17,7 mm ebatlı boruda kaynak dikişinin oluşumu	108
Şekil 4.5.	Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 4)	109
Şekil 4.6.	Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 5)	110
Şekil 4.7.	914x11,1 mm ebatlı boruda kaynak dikişinin oluşumu	111
Şekil 4.8.	Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 6)	112
Şekil 4.9.	Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 7)	113
Şekil 4.10.	Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 8)	114
Şekil 4.11.	İç kaynak noktasının pozisyonu (Deney 8 ve 9)	115
Şekil 4.12.	İç kaynak noktasının yerine bağlı olarak kaynak dikiş biçiminin değişimi (Deney 8 ve 9)	115
Şekil 4.13.	1067x14,27 mm ebatlı boruda kaynak dikişinin oluşumu	116
Şekil 4.14.	Kaynak dikişinin oluşumu (Deney 10)	117
Şekil 4.15.	Kaynak dikişine ait farklı görüntüler (Deney 11)	118
Şekil 4.16.	Kaynak dikişinin görünümü (Deney 12)	118
Şekil 4.17.	Kaynak dikişi görüntüleri (Deney 13)	119
Şekil 4.18.	Kaynak dikişi görüntüsü (Deney 14)	119
Şekil 4.19.	İç kaynak dikişi ve kaynak kepi kesitinin değişimi (1016x17,7 mm)	122
Şekil 4.20.	İç kaynak dikişi geometrik büyüklüklerinin değişimi (1016x17,7 mm)	122
Şekil 4.21.	Dış kaynak dikişi ve kaynak kepi kesitinin değişimi (1016x17,7 mm)	123
Şekil 4.22.	Dış kaynak dikişi geometrik büyüklüklerinin değişimi (1016x17,7 mm)	123
Şekil 4.23.	Chandel ve Tusek ‘in tel ergime formüllerinin karşılaştırılması	126
Şekil 4.24.	Kaynak ağzı ve kaynak kepi kesit kesitinin şematik gösterimi	127
Şekil 4.25.	Chandel ve Tusek formülleri ile elde edilen tel ergime miktarlarının toplam dolgu alanına göre hesaplanmış değerlerle karşılaştırılması	129
Şekil 4.26.	a)Deney 15 ‘e ait tel ilerleme hız ölçüm sonuçlarının gösterimi b)Deney 16 ‘ya ait tel ilerleme hız ölçüm sonuçlarının gösterimi c)Deney 17 ‘ye ait tel ilerleme hız ölçüm sonuçlarının gösterimi	134
Şekil 4.27.	Daire parçası ve kaynak dikiş kepi	136
Şekil 4.28.	Kaynak dikişi genişlik/derinlik oranı ile çatlak arasındaki ilişki	137
Şekil 4.29.	Genişlik/derinlik oranının malzeme kalınlığına bağlı olarak değişimi	138
Şekil 4.30.	Kaynak kepi alanının teorik hesaplama değerleri ile gerçek ölçüm değerlerinin karşılaştırılması	140
Şekil 4.31.	969x27,2 mm ebatlı boyuna dikişli boruya ait kaynak dikişi	140

Şekil 4.32.	Kaynak dikiş görüntüsü (Deney 18)	144
Şekil 4.33.	Malzeme ve kaynak dikişinin geçiş sıcaklık eğrisi (Deney 18)	146
Şekil 4.34.	-20 °C 'de ki çentik darbe mukavemetinin değişimi (864x8,74 mm)	150
Şekil 4.35.	Çentik darbe deney sonuçlarının minimum, maksimum ve ortalama değerlerinin gösterimi (Deney 18, 19 ve 20)	150
Şekil 4.36.	Deney 22, 23 ve 24 'e ait kaynak dikiş görüntüleri (1067x11,9 mm)	153
Şekil 4.37.	Deney 22, 23 ve 24 'e ait sertlik dağılımı (Hv)	153
Şekil 4.38.	Kaynak dikişinin görüntüsü (Deney 25)	154
Şekil 4.39.	Deney 25 'e ait sertlik dağılımı (Hv)	155
Şekil 4.40.	Çentik darbe deney sonuçlarının minimum, maksimum ve ortalama değerlerinin gösterimi (Deney 22, 23, 24 ve 25)	155
Şekil 4.41.	Spiral dikişli boru kaynağında iç ve dış kaynak noktalarının yeri	156
Şekil 4.42.	Kaynak dikişinin görüntüsü (Deney 26 ve 27)	157
Şekil 4.43.	Deney 26 ve 27 'ye ait sertlik dağılımı (Hv)	158
Şekil 4.44.	Çentik darbe deney parçalarının hazırlanışı (1067x15,88 mm)	160
Şekil 5.1.	Tozaltı kaynak yöntemi ile spiral dikişli boru üretiminde kaynak tasarım işleminin aşamaları	163
Şekil 5.2.	Kaynak parametrelerinin seçimi için geliştirilen bilgisayar program	167

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	3,2 mm tel çapı için kaynak akımına bağlı olarak ergime miktarı (kg/h)	20
Tablo 2.2.	Kaynak tozlarının bazikliğe göre sınıflandırılması (Linnert 1994)	34
Tablo 2.3.	Kaynak tellerinde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri	41
Tablo 2.4.	Tozaltı kaynağında kaynak tellerinin çaplarına göre çalışabileceği akım değerleri (ASM Handbook Committee 1983)	42
Tablo 2.5.	EN 756 'ya göre kaynak tellerinin kimyasal bileşimleri	42
Tablo 2.6.	C _{es} (IIW) için çeliklerde alaşım elementlerinin üst sınırı	57
Tablo 2.7.	C _{es} 'e göre ön tav sıcaklıklarının belirlenmesi	57
Tablo 2.8.	Ön tav uygulanmadan kaynak edilebilecek maksimum parça kalınlığı değerleri	57
Tablo 2.9.	Çeliklerin alaşımli sayılabilmesi için içerebilecekleri element miktarlarına ilişkin alt sınırlar (EURO-NORM 20-74)	71
Tablo 2.10.	Sweet-gaz boru hattında kullanılan X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi	82
Tablo 2.11.	Off-shore boru hattında kullanılan X-65 çeliğinin kimyasal bileşimi	83
Tablo 2.12.	Off-shore boru hattında kullanılan X-65 çeliğinin mekanik özellikleri	83
Tablo 3.1.	Kaynak dikişinden numune alma işlemi	101
Tablo 3.2.	Deneysel çalışmalarda kullanılan kaynak tellerinin kimyasal bileşimi	102
Tablo 4.1.	Deney 1 'e ait kaynak parametreleri (1016x17,7 mm, 1,80 m/dk)	105
Tablo 4.2.	Deney 2 'ye ait kaynak parametreleri (1016x17,7 mm, 1,50 m/d)	106
Tablo 4.3.	Deney 3 'e ait kaynak parametreleri (1016x17,7 mm, 1,20 m/dk)	107
Tablo 4.4.	Deney 4 'e ait kaynak parametreleri (914x11,1 mm, üç kafa)	109
Tablo 4.5.	Deney 5 'e ait kaynak parametreleri (914x11,1 mm, iki kafa)	110
Tablo 4.6.	Deney 6 'ya ait kaynak parametreleri (1219x14,27 mm)	112
Tablo 4.7.	Deney 7 'ye ait kaynak parametreleri (1067x14,27 mm)	113
Tablo 4.8.	Deney 8 'e ait kaynak parametreleri (1067x14,27 mm)	114
Tablo 4.9.	Deney 9 'a ait kaynak parametreleri	115
Tablo 4.10.	Deney 10 'a ait kaynak parametreleri (1422x12,5 mm)	117
Tablo 4.11.	Deney 11 'e ait kaynak parametreleri (1067x10,31 mm)	118
Tablo 4.12.	Deney 12 'ye ait dış kaynak parametreleri (1016x8,8 mm)	118
Tablo 4.13.	Deney 13 'e ait iç kaynak parametreleri (914x11,1 mm)	119
Tablo 4.14.	Deney 14 'e ait kaynak parametreleri (1016x9,8 mm)	119
Tablo 4.15.	Kaynak dikişi geometrik ölçüm sonuçları	120
Tablo 4.16.	Tel ergime miktarının teorik ergime miktarı ile karşılaştırılması	128
Tablo 4.17.	Deney 15 'e ait parametreler	130
Tablo 4.18.	Deney 15 'e ait tel ilerleme hız değerleri (m/dk)	130
Tablo 4.19.	Deney 16 'ya ait parametreler	131
Tablo 4.20.	Deney 16 'ya ait tel ilerleme hız değerleri (m/dk)	131
Tablo 4.21.	Deney 17 'ye ait parametreler	132
Tablo 4.22.	Deney 17 'ye ait tel ilerleme hız değerleri (m/dk)	132
Tablo 4.23.	Tel hızı ölçüm değerleri ile teorik ergime miktarının karşılaştırılması	135
Tablo 4.24.	Malzeme kalınlığına bağlı olarak kaynak dikiş geometrisi	137
Tablo 4.25.	Kaynak kepi alanının hesaplanmasına ait değerler	139
Tablo 4.26.	1067x17,48 mm ebatlı boyuna dikişli boruya ait kaynak parametreleri	141
Tablo 4.27.	969x27,2 mm ebatlı boyuna dikişli boruya ait kaynak parametreleri	141

Tablo 4.28.	969x27,2 mm ebatlı borunun kaynak dikişine ait geometrik ölçüler	142
Tablo 4.29.	969x27,2 mm için teorik olarak hesaplanmış geometrik büyüklükler	142
Tablo 4.30.	Boyuna dikişli borular için tel sarf değerleri ve dolgu kesit alanı	142
Tablo 4.31.	969x27,2 mm ebatlı boru için ısı girdisi ve soğuma süresi	142
Tablo 4.32.	Deney 18 'e ait kaynak parametreleri	143
Tablo 4.33.	Malzemenin ve kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (Deney 18)	144
Tablo 4.34.	Malzemenin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 18)	144
Tablo 4.35.	Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 18)	145
Tablo 4.36.	Değişik sıcaklıklarda malzemenin çentik darbe sonuçları (Deney 18)	145
Tablo 4.37.	Değişik sıcaklıklarda kaynak dikişi çentik darbe sonuçları (Deney 18)	145
Tablo 4.38.	İç ve dış kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (Deney 19)	146
Tablo 4.39.	Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 19)	147
Tablo 4.40.	İç ve dış kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (Deney 20)	147
Tablo 4.41.	Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 20)	147
Tablo 4.42.	Malzeme ve kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (Deney 21)	148
Tablo 4.43.	Malzemenin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 21)	148
Tablo 4.44.	Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 21)	148
Tablo 4.45.	Kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (Deney 18, 19 ve 20)	149
Tablo 4.46.	Deney 22 'ye ait kaynak parametreleri	152
Tablo 4.47.	Deneme 23 'e ait kaynak parametreleri	152
Tablo 4.48.	Deneme 24 'e ait kaynak parametreleri	152
Tablo 4.49.	Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe mukavemeti (J)	153
Tablo 4.50.	Deney 25 'e ait kaynak parametreleri	154
Tablo 4.51.	Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 25)	155
Tablo 4.52.	Deney 26 ve 27 'ye ait kaynak parametreleri	157
Tablo 4.53.	Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 26)	157
Tablo 4.54.	Kaynak dikişinin -20 °C 'de ki çentik darbe sonuçları (Deney 27)	158
Tablo 4.55.	1067x15,88 mm ebatlı boruya ait kaynak parametreleri	159
Tablo 4.56.	Malzeme ve kaynak dikişinin kimyasal bileşimi (1067x15,88 mm)	159
Tablo 4.57.	İç ve dış kaynak bölgesi ile kaynak orta bölgesinin -20 °C 'de ki çentik darbe mukavemeti sonuçları (ebat:1067x15,88 mm, numune yüksekliği: 7,5 mm)	160
Tablo 5.1.	Tel çapına bağlı olarak çalışılabilecek maks akım şiddeti değerleri	165

KAYNAKLAR

1. S.ANIK, K.TÜLBENTÇİ, 1966. Kaynak Metalürjisi Çelikler İçin. İstanbul.
2. S.ANIK, 1969. Kaynak Tekniği Cilt 1 (Oksi-Asetilen ve Elektrik-Ark Kaynağı). İTÜ Kütüphanesi, sayı: 766, İstanbul.
3. S.ANIK, 1975. Kaynak Tekniği Cilt-3 (Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti). İTÜ Kütüphanesi, sayı:1030, İstanbul.
4. S.ANIK, O.BODUR, 1979. Ark Kaynağında Soğuma Süresi ve Sıcaklık Çevrimleri. Sakarya D.M.M Akademisi Dergisi, Sayı: MMA-7, İstanbul.
5. S.ANIK, 1982. Kaynak Tekniği Cilt-2 (Tozaltı Kaynağı ve Koruyucu Gazla Kaynak), İTÜ Kütüphanesi, sayı:1217, 2. Baskı, İstanbul.
6. S.ANIK, K.TÜLBENTÇİ, 1989. Ark Kaynakçısının El Kitabı. Gedik, İstanbul.
7. S.ANIK, K.TÜLBENTÇİ, E.KALUÇ, 1991a. Örtülü Elektrot ile Elektrik Ark Kaynağı, Gedik Holding Yayını, İstanbul.
8. S.ANIK, 1991b. Kaynak Tekniği El Kitabı-Yöntemler ve Donanımlar, Gedik Holding Yayını, İstanbul.
9. ASM Handbook Committe, 1983. Welding, Brazing and Soldering. Metals Handbook. vol.6, page: 115-152, USA.
10. AWS, 2001. Welding Science and Technology. 9th Edition, USA.
11. BAVARIA SCHWEISSTECHNIK, 2003. Welding in Pipe Manufacturing. Germany.
12. B.V.BERSCH, F.O.KOCH, 1972. Schweißverhalten neu Entwickelter Hochfester Sonderrohrstahle. Bänder Bleche Rohre Nr. 1, Düsseldorf.
13. K.H.BRENSING, B.SOMMER, 1998. Steel Tube and Pipe Manufacturing Processes. Europipe, Germany.
14. CASTI, 2002, Welding Filler Metals. Fourth Edition, Casti Metals Data Book Series, Canada.
15. R.S.CHANDEL, H.P.SEOW, F.L.CHEONG, 1996. Effect of Increasing Deposition Rate on the Bead Geometry of Submerged Arc Welds. Journal of Materials Processing Technology 72, page: 124-128.

16. E.DENİZKUŞU, 2001. Bitirme Tezi, Mannesmann Boru Fabrikasında Üretimde Kullanılan Çelik Saçlarda Tane Boyutunun Mukavemet Üzerine Olan Etkisinin Belirlenmesi, Kocaeli Üniversitesi Müh. Fak. Kocaeli
17. DVS, 1987. Fügetechnik. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf.
18. K.EASTERLING, 1983. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. Butterworths&Co Publishers Ltd. England.
19. M.C. ENSARİ, 1977. Düşük Karbonlu Çeliklerde Üretim Koşullarının ve Bileşiminin Deformasyon Yaşlanmasına Etkileri, Doktora Tezi, İTÜ Maden Fak. İstanbul.
20. P.ERSOY, 2000. Bitirme Projesi, Mikro alaşımlı Çelikler, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İstanbul.
21. İ.B.ERYÜREK, 1998. Gazaltı (MIG/MAG) Kaynağı. As Kaynak, İstanbul.
22. ESAB Education, 1999. Submerged Arc Welding Manual. Sweden.
23. ESAB, Fluxes and Wires for Submerged Arc Welding. Sweden
24. EUROPIPE GMBH, 2002-1. QA/QC- Instruction Nr. 43045, Mülheim.
25. EUROPIPE GMBH, 2002-2. PQR No. 1342/10, Mülheim.
26. EUROPEAN STANDARD, 1995. EN 756; Welding Consumables-Wire Electrodes and Wire-Flux Combinations for Submerged Arc Welding of Non-alloy and Fine Grain Steel-Classification. Brussels.
27. EUROPEAN STANDARD, 1996. EN 760 Welding Consumables-Fluxes for Submerged Arc Welding. Brussels.
28. M.GRAF, K.NIEDERHOFF, 2000. Toughness Behaviour of the Heat-Affected Zone (HAZ) in Double Submerged-Arc Welded Large-Diameter Pipe. Mannesmannröhren-Werke A.G, Germany.
29. B.GÜLBAHAR, S.AKAY, 1989. Hafif Alaşımlı Yapı Çeliklerinin Ark Kaynağında Isıl Çevrimlerinin Bilgisayar Yardımı ile Hesaplanması. II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı. Sayfa: 197, Ankara.
30. Ş.GÜLEÇ, A.ALAN, 1993. Malzeme Bilgisi Cilt 1-Metal Malzemelere Genel Bakış. İTÜ Kütüphanesi, Sayı: 1521, İstanbul.
31. Ş.GÜLEÇ, A.ALAN, 1995. Malzeme Bilgisi Cilt II. 2. Baskı, İTÜ Kütüphanesi, Sayı: 1551, İstanbul.

- 32.** H.GÜLOĞLU, 2003. SAW-Kaynak Hataları ve Kısa Gösterimi. Yöntem Yaprığı No:789, Mannesmann Boru, İzmit.
- 33.** A.GÜLSÖZ, C.MERAN, 1997. Çeliklerin Kaynağında Ön Isıtmanın Belirlenmesi için Kullanılan Yöntemler. Mühendis ve Makina, sayı. 448, Ankara.
- 34.** N.GÜLTEKİN, 1991. Kaynak Tekniği. 2. Baskı, Engin Ofset, İstanbul.
- 35.** K.HULKA, F.HEISTERKAMP, J.M.GRAY, 1993. Metallurgical concept and full scale testing of high toughness H₂S resistant 0,03 %C – 0,10 %Nb steel. CBMM, Niobium Technical Report, Brasil.
- 36.** K.HULKA, 2001. Weldability of HSLA Steels. CBMM, Niobium Information, Brasil.
- 37.** J.P.JANSEN, J.C.CUIFFIER, V.THILLOU, 2002. How to Improve the Toughness at low Temperature of the Longitudinal Weld Seam of Pipes with w.t.<12,7 mm. Europipe, Germany.
- 38.** S.KARADENİZ, S.KARAOĞLU, 1995. Kaynak Makinası Seçimi. Gedik Eğitim Vakfı, Gedik Teknik 2, İstanbul.
- 39.** S.KARADENİZ, H.GÜNAY, 1999. Kaynak Makinalarındaki Son Gelişmeler ve Kaynak Kalitesine Etkileri. Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, sayfa: 133, Ankara.
- 40.** LINCOLN ELECTRIC, 1988. Storing and Redrying Submerged Arc Welding Fluxes. S621, USA.
- 41.** LINCOLN ELECTRIC, 1989. Porosity its causes and cures in submerged arc welding. Bulletin No: S 620, USA.
- 42.** LINCOLN ELECTRIC, 1991. Lincoln Weld, Submerged Arc Welding. S210, USA.
- 43.** LINCOLN ELECTRIC, 1994a. The Procedure Handbook of Arc Welding. 13th Edition, Sec. 6, USA.
- 44.** LINCOLN ELECTRIC, 1994b. How to Make Single Electrode Submerged Arc Welds. C5.600, U.S.A.
- 45.** LINCOLN ELECTRIC, 1998. How to Make Circumferential Welds in Submerged Arc Welding. C5.630, U.S.A.
- 46.** LINCOLN ELECTRIC, 2000. Specialised Welding Training Programs. European Weld Tech. Centers, France.

- 47.** G.E. LINNERT, 1994. Welding Metallurgy-Carbon and Alloy Steels. Fourth Edition, vol.1, chapter 7, USA.
- 48.** MANNESMANN ROHRENWERKE, 1986, The Manufacture and Testing of Steel Pipe and Tubing. Düsseldorf.
- 49.** MESSER GRIESHEIM, 1970. Handbuch für des Unterpulver-Schweiben.
- 50.** P.MULLER, L.WOLFF. 1983. Handbuch des Unterpulverschweißens. Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS), Düsseldorf.
- 51.** H.NIES, B.KEVILLE, B.SCHLATTER, 1996. Schweißen von Großrohren mit dem Unterpulver-Mehrdrabtverfahren. Schweissmitteilungen Oerlikon, Nr. 131, Zürich.
- 52.** B.ÖĞÜZ, 1975. Ark Kaynağı El Kitabı. Oerlikon Yayını, İstanbul.
- 53.** B.ÖĞÜZ, 1989. Ark Kaynağı. 2. Baskı, Oerlikon Yayını, İstanbul.
- 54.** H.W.PALMEN, H.G.CHIFFERS, 1997. Machines and Plants for the Manufacture of Welded Large-Diameter Pipes. Tube&Pipe Asia.
- 55.** P.A.PETERS, H.G.FRACKMANN, H.CHRISTMANN, W.WIESCHE, 1982. The Manufacture of Spiral Welded Pipe with Integrating Quality Assurance. Metals Society Conference, Manufacture, fabrication and operation of pipelines, Glasgow.
- 56.** P.A.PETERS, M.K. GRAF, G.HILLENBRAND, K.A.NIEDERHOFF, 1998. Modern Line Pipe Steels for Off-Shore Use. Offshore Pipeline Technology Seminar, Stavanger.
- 57.** PETROGAS, 1999. Dünya Daha Çok Enerji İstiyor. Petrogas Botaş Vakfı Yayın Organı, Sayı: 10, Ankara.
- 58.** A.F.SAKARYALI, 2003. Rakip Rekabet Raporu Ocak-Haziran 2003. Borusan Boru Pazarlama Bölümü, İstanbul.
- 59.** Y.SUGITANI, 1991. Arc Welding Robot with Control of Depth and Bead. Tube International.
- 60.** A.TEKİN, 1984. Çelik ve Isıl İşlem. Bofors El Kitabı, sayfa. 111, Hakan Ofset, İstanbul.
- 61.** J.TUSEK, 1999. Mathematical Modelling of Melting Rate in Twin-Wire Welding. Journal of Materials Processing Technology 100, page: 250-256.
- 62.** K.TÜLBENTÇİ, 1984. Karbonlu ve Az Alaşımli Çeliklerin Kaynağı. Böhler Kaynak Dünyası, sayı:9, İstanbul.

- 63.** K.TÜLBENTÇİ, E.KALUÇ, 1997a. Kaynak Teknolojisinde Yeni Nesil Akım Üreteçleri: İnverterler. Kaynak Teknolojisi I. Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, sayfa: 93, Ankara.
- 64.** K.TÜLBENTÇİ, E.KALUÇ, N.Y.SARI, 1997b. MIG-MAG Eriyen Elektrot ile Gazaltı Kaynak Yöntemi. Seminer Notları, Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi Araştırma Eğitim ve Uygulama Merkezi, Kocaeli.
- 65.** K.TÜLBENTÇİ, 1998. Gazaltı Kaynak Yöntemi MIG/MAG. Arctech, İstanbul.
- 66.** K.TÜLBENTÇİ, E.KALUÇ, 2001. İnce Taneli Yapı Çeliklerinin Kaynak Edilebilirliği, Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul.
- 67.** K.C.YUNG, B.RALPH, W.B.LEE, R.FENN, 1997. Investigation into welding parameters affecting the tensile properties of titanium welds. Journal of Materials Processing Technology-63.
- 68.** M.YÜKSEL, A.Ç.CAN, 1989. İnce Taneli Çeliklerin Kaynağı. II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı, sayfa: 369, İstanbul.
- 69.** M.YÜKSEL, 1996. Çeliklerin Kaynağında Karbon Eşdeğerinin Rolü. Mühendis ve Makina, Cilt 37, Sayı: 440, Ankara.
- 70.** F.J.WEISWEILLER, G.N. SERGEEV, 1988. Non-Destructive Testing of Large-Diameter Pipe for Oil and Gas Transmission Lines. VCH, page: 31-64.

DOĞDUGUMDAN BERİ
EKMEĞİNİ YEDİĞİM SUYUNU
İŞTİĞİM BU ÜLKEYE
BÖYLE BİR ÇAURMAYI
KAZANDIRMAKTAN SON
DERECE MUTLUYUM
VE YAPANI' EMĞİ
GEÇENLERİ KUTUYORUM.
YOLUNUZ AĞIK OLSUN

Prof. Dr. Erdiŋ KAWG
22. 12. 2003 (24⁰⁰)