

PETROL VE DOĞALGAZ BORU HATLARININ YAPIMINDA KULLANILAN SÜPERMARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER VE KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİ

Emel TABAN *,
Erdinç KALUÇ **

Uzun yıllardan beri uluslararası ve ulusal petrol ve doğalgaz boru hatlarının yapımında, kullanılan alışımlı az alaşımlı çeliklerden üretilmiş boruların zaman içinde korozyona uğrayarak, onarılması güç hasarlar oluşması ve tamiri ile değişim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle öncelikle günümüzden yirmi yıl önce geliştirilen duplex paslanmaz çeliklerin boru yapımında kullanımı gündeme gelmiş; ancak bu tür paslanmaz çeliklerin maliyetlerinin çok yüksek olması ve kaynaktan sonraki süreçte ortaya çıkan metalurjik problemler nedeniyle daha ekonomik ve yeterli korozyon direncine sahip süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin geliştirilmesi gereksinimi doğmuştur. Kaynak kabiliyetleri alışımlı martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerden daha iyi olan bu tür çelikler, yüksek mukavemet ve düşük tokluk özelliklerinin yanısıra yeterli korozyon direncine de sahiptirler. Bu çalışmada, boru hattı yapımında kullanılmak üzere geliştirilen süpermartenzitik paslanmaz çelikler, bunların kaynak edilebilirlikleri incelenmiştir.

Anahtar sözcükler : Süpermartenzitik paslanmaz çelikler, TIG, MIG, tozaltı kaynak yöntemi, kaynak edilebilirlik

The conventional steels used for pipeline on- and offshore applications in the oil & gas industries are exposed to corrosion by time and suffer damages that are hard to repair, consequently duplex stainless steels are developed for pipelines twenty years ago but the metallurgical problems occurring after welding and being expensive, cost effective and sufficient corrosion resistant supermartensitic stainless steels are demanded. Weldable supermartensitic stainless steels have shown considerable development on various aspects, they offer good weldability in combination with high strength, good low temperature toughness and sufficient corrosion resistance. In this investigation, supermartensitic stainless steels and their weldability have been investigated and discussed.

Keywords : Supermartensitic stainless steels, TIG, MIG, submerged arc welding process, weldability.

* Arş. Gör., KOÜ Mühendislik Fakültesi Mak. Müh. Bölümü

** Prof. Dr., KOÜ Mühendislik Fakültesi Mak. Müh. Bölümü

GİRİŞ

Uzun yıllardan beri petrol veya doğalgazın taşındığı uluslararası ve ulusal boru hatlarının yapımında, alışımlı çelikler ve/veya ince taneli yapı çeliklerinden üretilmiş borular kullanılmaktadır. Ancak, bu çeliklerde gerek dış etkiler gerekse de içerisinden geçen akışkanın korozif etkisinden dolayı zaman içinde paslanma başlayarak, onarılması güç hasarlar oluşması ve bu tür hasarların tamiri ile borunun değişim maliyetinin yüksek olması bu hatları inşa eden ve kullananları, aşınma ve korozyona dirençli yeni tür alaşımlardan üretilmiş boru çeliklerinin seçimine zorlamıştır. Bunun üzerine, öncelikle günümüzden yirmi yıl önce geliştirilen duplex (çift fazlı) paslanmaz çeliklerin boru yapımında kullanımı gündeme gelmiş; ancak bu tür paslanmaz çeliklerin maliyetlerinin yüksek olması ve kaynaktan sonraki süreçte ortaya çıkan bazı metalurjik problemler nedeniyle daha ekonomik ve yeterli korozyon direncine sahip süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin geliştirilmesi gereksinimi doğmuştur.

Süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin ilk türlerinde akma mukavemeti en az 550 MPa (X80 türü) günümüzde geliştirilenlerde de en az 800 Mpa (X120) civarındadır. Süpermartenzitik paslanmaz çelikler, duplex (çift fazlı) paslanmaz çelikler ile karşılaştırıldıklarında iki ana faktör olan yüksek mukavemet ve ekonomiklik ön plana çıkmaktadır (1,2,3).

Literatürde, önceleri az karbonlu krom- nikelli martenzitik paslanmaz çelikler (yumuşak martenzitik paslanmaz çelikler) olarak da adlandırılan bu tür çeliklerin son geliştirilmiş türleri % 0.015' den daha az karbon içeriğine sahiptir. Bunlar, bileşimlerinde %12- 13 Cr, %4- 6 Ni ve bazı türlerinde de % 2.5' a kadar Mo içeren ve kaynak kabiliyetleri alışımlı martenzitik kromlu paslanmaz çeliklerden daha iyi olan çeliklerdir. Bu tür çelikler, yüksek mukavemetleri ve düşük sıcaklıklarda iyi tokluk özelliklerinin yanı sıra özel işleme tabi tutularak yumuşatılmış ve hafif asidik petrol ürünlerinin bulunduğu kimyasal ortamlara karşı yeterli korozyon direncine de sahiptirler. Aynı zamanda, kaynakta uygulamayı zorlaştıran ve ek maliyet getiren öntav

ve son tav gibi ısı işlemlerin yapılmasının zor olduğu saha kaynakları için de uygundur (3,4,5).

Boru hatları için, % 13 Cr' lu çeliklerin ilk geniş çaplı uygulamasını 1980' lerde santrifüj döküm ile üretilmiş boru malzemesi (AISI 410) kullanımında görmekteyiz. Endonezya' da yapılan bu uygulamada, yeterli tokluk değerleri elde etmek için öntav ve kaynak sonrası ısı işlem yapılmıştır; bu boruların kullanıldığı tesisler hala başarı ile kullanımdadır (1).

Gerçekten, kaynak edilebilir süpermartenzitik paslanmaz çelik kalitelerle 1995' lerde Statoil ve NAM, dikişsiz boruları değiştirmek için akış projelerine başladığı zaman karşılaşmıştır. Statoil, kıtalararası Asgard ve Gullfaks projeleri için H2S oluşumundan dolayı ortaya çıkan problemleri önlemek amacıyla orta ve yüksek alaşımlı süpermartenzitik paslanmaz çelik malzeme seçerken NAM ise deniz kıyısındaki boru hatları için az alaşımlı süpermartenzitik çelikleri tercih etmiştir (1,6).

Kaynak edilebilir süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin ana uygulama alanları petrol ve doğalgazın ulusal ve uluslararası boru hatları ile taşınımı olmakta ve özellikle su altında döşenen boru hatlarına alternatif olarak kullanılmaktadır. Özellikle Statoil, Kuzey Denizi'nde Asgard ve Gullfaks Satellites projelerinde süpermartenzitik paslanmaz çelikleri kullanarak Gullfaks bölgesindeki hatlara 122 km' lik Asgard' da da 137 km'lik ek boru hattı inşa etmiştir. Ayrıca, 9 km' lik bir link hattı da petrol platformu ile birleştirilmiştir. Bunlara ek olarak Huldra' da, Norveç Denizi ve Barent Denizi'nde de yeni projeler gündeme alınmıştır. Statoil ileriye dönük olarak Vietnam'da da yeni bir hattın yapımını projelendirmektedir. Diğer petrol firmaları olan Norsk Hydro, BP ve Shell de süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin kullanılacağı yeni projeler geliştirmektedirler (1,6).

Dünyadaki diğer bir uygulama da 90' ların sonunda, Japonlar tarafından ince et kalınlıklı, kaynak dikişli borular üzerinde yapılmış çalışmalarda görülmektedir

ve süpermartenzitik paslanmaz çelik malzemeler için yüksek hızda boru üretim hattı kurulması amaçlanmıştır. Değişik teknik problemlere ve Japon çelik endüstrisinin temel yapılandırmasına bağlı olarak, bu tür boru malzemesinin büyük ölçüde kullanımına geçici bir süre ara verilmiştir (1).

Günümüze dek dünyanın dört yanında 600 km' den fazla süpermartenzitik paslanmaz çelik boru hattı projesi tasarlanmıştır, bu sayede operatör ve yüklenicilerin önemli deneyimleri olmuştur. Diğer ulusal projeler ise, Hollanda, Nijerya ve Umman gibi çeşitli ülkelerde tamamlanmıştır. Her projenin içinde bazı zorluklarla karşılaşılmasına karşın, birkaç uluslararası yüklenicinin projelendirmede ve süpermartenzitik paslanmaz çelik boru hattı tesisatı yapımı ile iyi bir deneyim kazandığı belirtilmektedir (1).

Süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde; TIG kaynağı, metal özlü tel ile MIG kaynağı, çevresel dar aralık MIG kaynağı, plazma ark kaynağı ve tozaltı kaynağı yöntemleri geniş uygulama alanı bulmaktadır (4, 7, 8). Örtülü elektrod ile ark kaynağının yaygın uygulama alanı bulamamasının nedeni; kabul edilebilir tokluk değerlerinde kaynak dikişlerinin elde edilememiş olmasıdır (2). Dolayısı ile elektrod üreticileri de uzun araştırmalar sonucunda süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin çeşitli kaynak yöntemlerinde kullanılmak üzere özlü tel, dolu tel ve toz geliştirmişlerdir (2,3).

Süpermartenzitik paslanmaz çelik boruların üretiminde de elektron ışın veya lazer ışın kaynağı ya da bu yöntemler ile kombine edilmiş ark kaynak yöntemleri de kullanılabilir (Plazma+ TIG kaynağı, lazer+ MIG kaynağı) (9,10).

Bu çalışmada, boru hattı yapımında kullanılmak üzere geliştirilen süpermartenzitik paslanmaz çelikler, bu tür çeliklerin metalurjik özellikleri, çeşitli kaynak yöntemlerinin uygulanması için geliştirilen elektrod, özlü tel ve tozların seçimi ile kaynak edilebilirliklerinde karşılaşılan problemler ve çözüm önerileri sunulmuştur.

SÜPERMARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER VE GELİŞİM AŞAMALARI

Az Karbonlu Krom-Nikelli Martenzitik Paslanmaz Çelikler (Yumuşak Martenzitik Paslanmaz Türler)

Az karbonlu krom- nikel içeren martenzitik paslanmaz çelikler, 1950' lerin sonlarına doğru martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynak edilebilirliklerini geliştirmenin yanı sıra ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinde tane irileşmesi sonucu oluşan tokluk azalması problemi dikkate alınarak üretildiler. Bu gelişmelerin arkasındaki temel düşünce, martenzitik yapının tokluğunu düzeltmek için

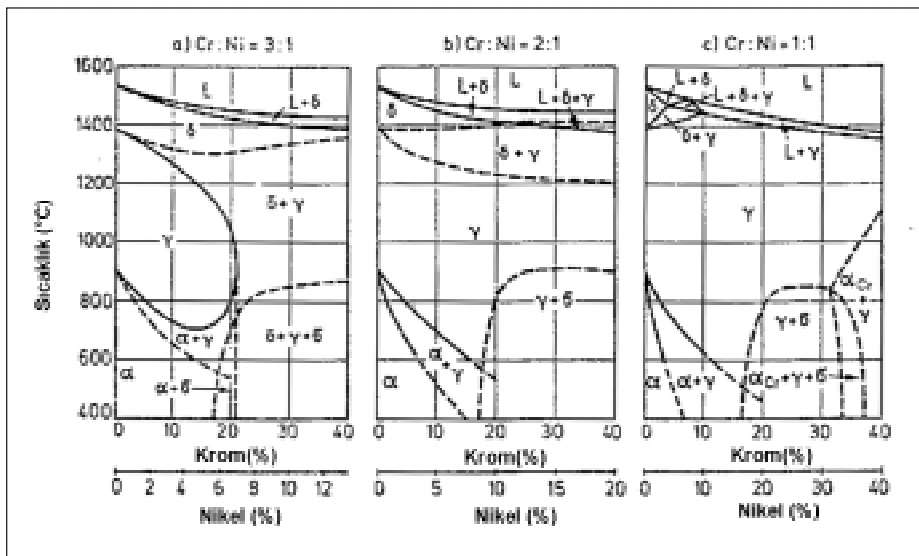
karbon içeriğinin %0.04' e düşürülmesi olmuştur. Ayrıca, soğuk çatlama tehlikesini azaltmak ve % 4- 6 Ni eklenmesi ile ostenit alanını genişleterek yapıyı olabildiğince delta ferritten arındırmak esas alınmıştır. Tablo 1' de ilk olarak geliştirilen ve daha sonra süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin geliştirilmesinde öncülük eden az karbonlu martenzitik paslanmaz çelik türleri görülmektedir (11,12).

Süpermartenzitik Paslanmaz Çeliklerin Metalurjik Özellikleri

Fe-Cr-Ni denge diyagramında Ni ve Cr' un birlikte etkileri Şekil 1' den izlenebilir. Burada, Cr:Ni= 3:1

Tablo 1. Az Karbonlu Martenzitik Cr-Ni-Mo' li Paslanmaz Çelikler ile Cu ve Nb İçeren Türlerin Kimyasal Bileşimleri (11).

Çelik	AISI	Kimyasal Bileşim (ortalama %)					
		C _{max}	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb
13Cr 1.5Ni	414	0.05	13	0-0.4	1-2	-	-
13Cr4Ni	-	0.05	13	0.4	4	-	-
13Cr4Ni1.5Mo	-	0.05	13	1.5	4	-	-
13Cr6Ni	-	0.05	13	0.4	6	-	-
13Cr6Ni1.5Mo	-	0.05	13	1.5	6	-	-
16Cr6Ni	-	0.05	16	-	6	-	-
16Cr5Ni1.5Mo	-	0.05	16	1.5	5	-	-
17Cr4Ni	-	0.05	17	-	4	-	-
17Cr4Ni1.5Mo	-	0.05	17	1.5	4	-	-
14Cr5Ni1.5Mo+ Cu+Nb	-	0.05	14	1.5	5	1.5	0.2
17Cr4Ni3Cu+Nb	630	0.05	17	-	4	3	0.3

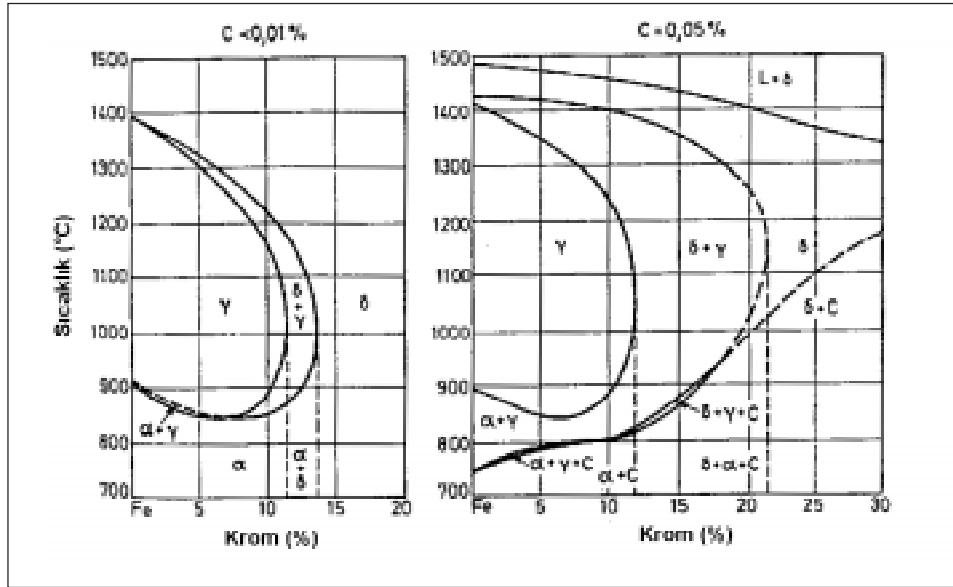


Şekil 1. Krom ve Nikel Miktarlarına Göre Fe-Cr-Ni Denge Diyagramları (11).

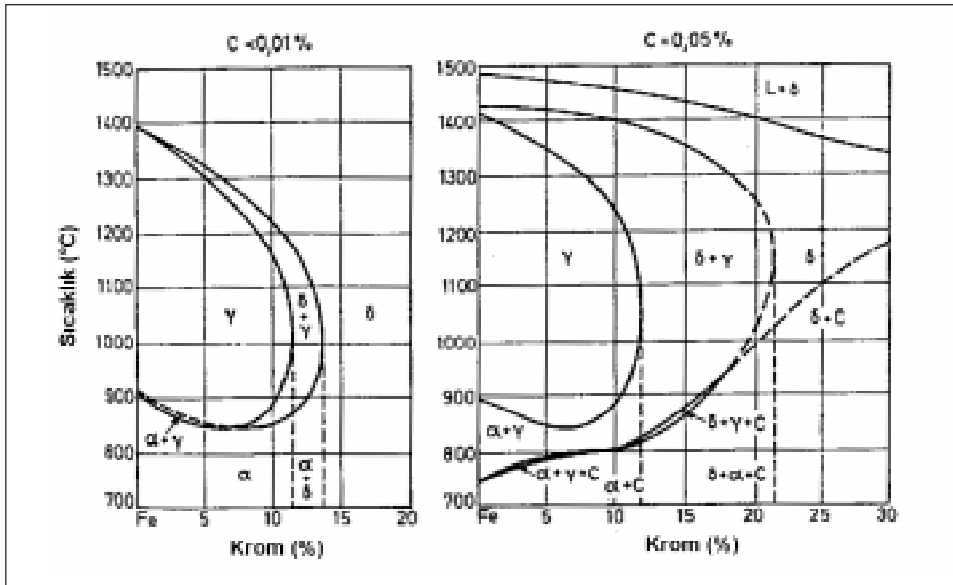
oranında, 12/4 ve 15/5 Cr-Ni alaşımının soğuma ve katılaşmasında oluşan fazlar da görülmektedir. Başlangıçta bu alaşımlar δ ferrit tanecikleri biçiminde katılaşır. 1300 °C civarında $\delta \rightarrow \gamma$ dönüşümü başlar ve 1200 °C civarında da denge koşullarına bağlı olarak biter (8,11).

Ferritik ve martenzitik paslanmaz çeliklerin metalurjik bileşimleri ve davranışları %0.01, %0.05, %0.1 ve %0.2 karbon miktarları için Şekil 2a ve b' deki Fe- Cr denge

diyagramında gösterilmektedir. Bu alaşımların belirtildiği faz diyagramları gerçek endüstriyel alaşımlara ait diyagramlar olmamalarına karşın esas metalin ve IEB'nin ve de kaynak dikişinin (döküm yapısının) özelliklerini anlamak açısından yardımcı diyagramlardır. Bu diyagramlarda yatay ekseninde değişen krom miktarı ve sıcaklığa bağlı olarak oluşan faz dengesi verilmiş olup soğuma hızının ve kromun önemli bir etkisi görülmektedir. Zira, krom ostenitin, ferrit+ karbürlere



Şekil 2a. Demir-krom Denge Diyagramında γ , δ ve α Bölgeleri (%0.01C ve %0.05C miktarları için) (11).



Şekil 2b. Demir-krom Denge Diyagramında γ , δ ve α Bölgeleri (%0.1C ve %0.2C miktarları için) (11).

dönüşümünde dikkate değer geciktirici bir etkiye sahiptir. Bu durumun iki ana sonucu vardır; ostenit normal soğuma koşulları altında martenzite dönüşür ve krom bu martenzitin temperleme direncini artırır (8,11).

Demir-krom sistemi paslanmaz çelikler grubunun temelini oluşturur. Krom, kübik hacim merkezli kristal kafes (KHM) yapısına sahip ferriti kararlı hale getirir. Ayrıca krom, demir-krom denge diyagramında kübik yüzey merkezli (KYM) kristal kafes yapısına sahip ostenitin oluşturduğu bölge olan ostenit (γ) alanını da kapalı hale getirir ve bu faz en büyük krom çözünürlüğünü (% 12), 1000 °C civarında gösterir. Demir-krom denge diyagramından da görüldüğü gibi 1390 °C'nin üzerinde ve 830°C'nin altındaki sıcaklıklarda hiçbir bölgede ostenite rastlanmaz (11,13,14).

Diyagramın sol üst tarafında bulunan bir cep biçimindeki γ alanı alaşımın içeriğindeki karbon miktarına bağlı olarak genişlemektedir. γ alanını genişleten diğer bir element de azottur. Çok kuvvetli birer ostenit dengeleyici olan C ve N, γ alanını genişleterek ostenit içinde kromun çözünürlüğünü artırır. Örneğin, burada karbon+azot (C+N) miktarı % 0,13'e eriştiğinde $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ dönüşümünün görülebilmesi için krom içeriğinin % 24'e, C+N miktarının % 0,2'ye çıkması halinde ise krom miktarının % 27'ye yükselmesi gerekmektedir (11,12).

Fe- Cr- Ni faz diyagramı, bileşim oranlarında, ısıtma ve soğutma sırasındaki çeşitli faz dönüşümleri nedeniyle oldukça karışıktır. Ayrıca, soğuma oranları; sonraki üretim kademeleri veya malzemelerin servis koşullarında kullanımı sırasında dönüşüme uğrayabilen değişik meta- stabl mikroyapı elementlerinin oluşumuna neden olur. Aslında, süpermartenzitik paslanmaz çelik alaşım tasarımı, martenzit alanı içinde ama ferrit ve/veya ostenitin oluşabildiği sınırdaki metalurjik dengeleme olayıdır. Bunun için temel nedenler, ferrit ve ostenit yapıcılarını yüzdelerini kullanarak alaşım

maliyetini sınırlarken olabilen en iyi mekanik özellikleri de elde etmektir. Aynı zamanda, bu amaç için uygun alaşım elementlerinin karışımının dikkatle yapılarak arzu edilen korozyon özellikleri elde edilmelidir. Diğer temel gereksinimler, geliştirilmiş kaynak edilebilirlik için karbon ve azotun düşürülmesi ve iyi tokluk özellikleri elde etmek için aşırı derecede temiz çelik içyapısı sağlanmasıdır. Sonunda ıslah çeliklerine (hızlı soğutma ile sertleştirme+ temperleme uygulanmış çelikler) uygulanan bir ısı işlem yapılmalı ve temperleme işleminin uygulanmasına özen gösterilmelidir. Süpermartenzitik paslanmaz çelik alaşımların bir başka pratik yanı da esas mekanik özelliklerini kaybetmeden ısı işlemlere karşı başarıyla gösterdikleri toleranstır (1,8,15).

Birkaç açık konuya karşın, süpermartenzitik paslanmaz çelik alaşımların değişik işlemler karşısındaki metalurjik davranışlarının anlaşılması olanaklıdır. Her büyük çelik sağlayıcısı bugün; örneğin; boru üreticilerine eldeki uygulama için uygun mekanik özellikleri sağlayabilmelerinde hangi ısı işleminin nasıl uygulanabileceğini söyleyebilmektedirler (1,8).

Süpermartenzitik Paslanmaz Çelik Kaliteler

Petrol ve gaz endüstrisindeki potansiyel uygulama oranını kapsayacak şekilde, az karbonlu süpermartenzitik paslanmaz çelikler için üç kalite ortaya çıkmıştır; az, orta ve yüksek alaşımlı süpermartenzitik paslanmaz çelikler. Böyle bir kalite spektrumu sayesinde, özel uygulamalar için her üretici kendi uygun seçeneklerini sunabilmektedir. Zira, özellikle artan alaşım miktarlarına bağlı olarak sülfütlü gerilmeli korozyon çatlamasına direnç artırılmıştır ve bu özellikle gaz ve petrol ürünlerinin taşınmasında ortaya çıkacak korozyonun etki şiddetine bağlı olarak çelik seçimine olanak sağlanmıştır. Tablo 2, 3 ve 4' de çeşitli üreticiler tarafından geliştirilen süpermartenzitik kaliteler verilmektedir (8).

Tablo 2. Az Alaşımlı Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler (%11Cr-%2Ni, Molibdensiz) (8).

Ticari Adı	Kimyasal Bileşim (%)									Üretici
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Diğer	
FaferX80 11Cr- 'Ni	.015	1.7	0.2	10.5	1.8	<0.1	0.5	<.012	-	CLI-Fafer
KL-12Cr-X80	.01	1.2	0.2	11	1.5	-	0.5	<.012	-	Kawasaki

Tablo 3. Orta Alaşımlı Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler (%12Cr-%4.5Ni, %1.5Mo) (8).

Ticari Adı	Kimyasal Bileşim (%)									Üretici
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Diğer	
Super 13Cr-M	.01	0.4	0.2	13	5	<0.7	-	-	Ti-0.1	Sumitomo
Fafer X80 12Cr 4-5Ni 1-5Mo	.015	1.7	0.2	11.5	4.5	1.4	0.5	<.012	-	CLI-Fafer
“Sweet” %1 Mo	<.015	0.5	0.2	11	3.5	1	-	<.01	Ti-0.03	Nippon Steel
‘F2NM2’	0.01	0.6	0.4	13.4	3.8	0.4	-	0.015	-	Vallourec
‘Hp13Cr’	<.03	0.4	<.3	13	4	1	-	0.05	-	Kawasaki
‘D 13.5.2N’	0.02	0.7	0.3	13.3	4.8	1.6	0.1	0.08	-	Dalmine
‘CRS’ (>95ksi)	0.02	0.5	0.3	12.5	4.5	1.5	1.5	0.02	-	Nippon Steel

Tablo 4. Yüksek Alaşımlı Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler (%12Cr-%6.5Ni, %2.5Mo) (8)

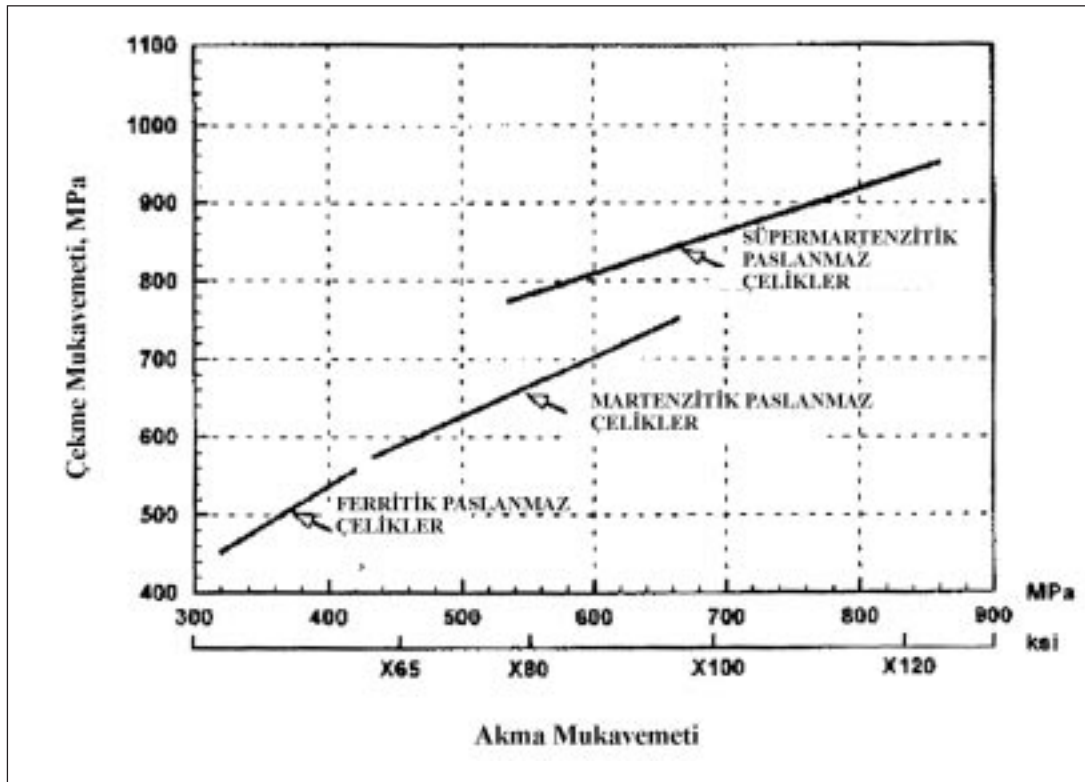
Ticari Adı	Kimyasal Bileşim (%)									Üretici
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Diğer	
UNS S42416 Super 13Cr-S	.01	0.4	0.2	12	6.5	2.5	-	-	Ti-0.1	Sumitomo
Fafer X80 12Cr 6Ni 2-5Mo	.01	1.7	0.4	12	6.5	2.5	-	<.012	-	CLI-Fafer
KL-HP-12Cr	.01	0.5	0.3	12.3	5.5	2.1	-	<.01	Ti-0.03	Kawasaki
“Mild Sour” %2Mo	<.015	0.5	0.2	11	5.2	2	0.6	<0.01	Ti-0.02	Nippon Steel
“Sour”3%Mo	<.015	0.5	<0.2	11	6	2.5	0.7	<0.01	Ti-0.02	Nippon Steel
‘Super 13Cr’ (13-5-2)	0.02	0.4	0.2	12.5	5	2	-	<0.08		Sumitomo
‘Super 13Cr’ (13-6-2.5-Ti)	<0.01	0.4	0.3	12	6.2	2.5	-	<0.01	Ti-0.06 veya 0.3	Sumitomo
‘Super 13Cr’ (12-5-2)	0.02	0.5	0.2	12.2	5.5	2	0.2	0.02	V-0.2	British Steel

Süpermartenzitik paslanmaz çelik boruların mukavemet özellikleri oldukça iyidir (Şekil 3), boru hatları yapımı için kullanılan ve ilk geliştirilen çelik X80 (550 MPa akma mukavemetli) çeliğidir ve bu grup çelikler içindeki en düşük akma mukavemetine sahip kalitedir. Zira kullanıcılar, daha yüksek mukavemetli kaliteler ile ağırlık ve ürün fiyatından tasarruf sağlamayı amaçlamışlar ve akma mukavemeti 700 MPa'ın üzerinde olan orta ve yüksek alaşımli süpermartenzitik paslanmaz çelikleri de geliştirmişlerdir (8).

Bu tür çelikler, doğru temperleme ısıl işlemi

uygulandıkları zaman oldukça iyi tokluk özelliklerine sahiptirler. Dolayısı ile -40, -50 °C'ye kadar olan düşük sıcaklıklardaki uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilirler. Örneğin, tüm kaliteler -80°C' de 100J çentik darbe enerjisi verecek biçimde tasarlanmışlardır (8).

Süpermartenzitik paslanmaz çelikler iyi yüksek sıcaklık özelliklerine de sahip olup duplex paslanmaz çeliklerle de karşılaştırılabilecek şekilde 250°C'ye kadar olan sıcaklıklarda mukavemet, sertlik ve korozyon dirençlerini korurlar (2,8).



Şekil 3. Martenzitik ve Ferritik Paslanmaz Çelikler ile Süpermartenzitik Paslanmaz Çeliklerin Akma ve Çekme Mukavemetleri Arasındaki İlişki (8).

SÜPERMARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİ

Süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin anahtar karakteristiği; onların üstün kaynak edilebilirlikleridir. Tablo 2,3 ve 4' den de görüldüğü üzere bu türler çok düşük karbon içeriği ile üretilir. Bazı türler, < %0.005 C ve < %0.01 N içerirler. Bu birliktelik, ısıdan etkilenmiş bölgede az miktarda arayer katı eriyiği oluşumunu sağladığından düşük sertlik ve yüksek tokluğa neden olur ve böylece öntav ve sontavdan kaçınılma yararı sağlar. Bu tür çelikler manyetik olduklarından kaynak sırasında ark üfleme olayına özellikle dikkat edilmelidir (8).

Süpermartenzitik paslanmaz çelikler piyasaya ıslah edilmiş halde boru, plaka, içi dolu çubuk biçimlerinde sunulurlar. Bu tür çeliklerin kaynağında hidrojen yayını oluşması bilinen bir tehlikedir ve hidrojen çatlaması olayına yol açar. Bu açıdan, bu tür çeliklerin kaynak işlemlerinde kullanılan ek kaynak metallere (elektrodların) düşük

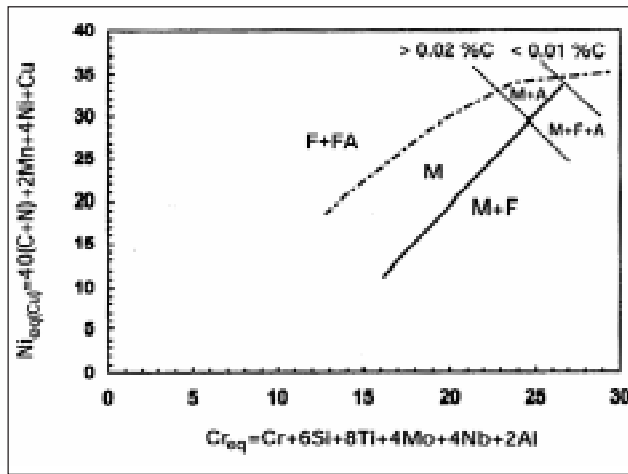
hidrojen içerikli yani bazık tür olmaları gerekmektedir. Bu tür çeliklerin kaynağı için elektrod seçiminde aşağıdaki faktörler gözönüne alınmalıdır.

- Esas malzeme mukavemeti ile uygunluk,
- Yeterli tokluğu elde etme,
- Sertliği kabul edilebilir seviyelerde tutma,
- Kaynak dikişinin esas malzeme ile aynı korozyon direncine sahip olması,
- Kaynak sonrası bir ısıl işlem uygulamasından sakınılması (3,10).

Süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin kaynak metali mikroyapısının kimyasal bileşimden gidilerek önceden saptanmasını sağlayabilen bir diyagramın geliştirilmesinin gereksinimi bu tür çeliklerin kaynağı için elektrod geliştirilmesinin ilk aşamalarında fark edilmiştir. Zira, kaynak metalinde optimum metalurjik ve mekanik özellikleri elde edebilmek için ferritin (delta) olumsuz

etkisi, ostenitik katılaşma ve fazla miktarda kalıntı ostenit oluşması önlenmelidir. Ancak kaynak metali bileşim yüzdesini veren bir diyagram ya da eşitlik ne literatürde ne de mevcut çalışmalarda bulunmaktadır. Bu yüzden süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin kaynak metali için yeni bir saptama diyagramı geliştirilmesi gereksinimi ortaya çıkmıştır (3).

Balmforth ve Lippold (16) tarafından önerilmiş ilk diyagramdan yola çıkılarak yeni bir saptama diyagramı Kaltenhauser tarafından geliştirilmiştir. Bu diyagramda, Cr ve Ni eşdeğeri temel alınarak oluşturulmuş; ancak Cr eşdeğerine Nb, Ni eşdeğerine de Cu eklenmiştir. Yapılmış olan kaynak deneylerinin sonuçlarına göre elde edilen tüm bilgilerden yola çıkılarak diyagramda sınır çizgileri oluşturularak yeni saptama diyagramı çizilmiştir. Böylece,



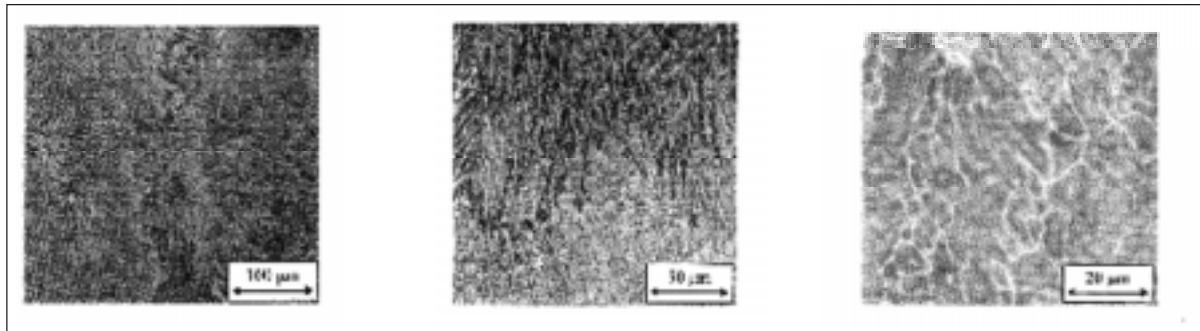
Şekil 4. Süpermartenzitik Paslanmaz Çelik Kaynak Metalleri İçin Saptama Diyagramı (3).

değişen Mo içeriğine sahip süpermartenzitik paslanmaz çeliklere uygun elektrod seçiminin yapılabileceği yararlı bir diyagram ortaya çıkmıştır. (Şekil 4).

Kaynak metaline ait olan martenzitik (M), Martenzit+Ferrit (M+F) ve saptama diyagramının karışık katılaşma mikroyapıları da Şekil 5, 6 ve 7' de görülmektedir.

SÜPERMARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAĞI

Süpermartenzitik paslanmaz çelikler çok düşük karbon içeriklerinden dolayı, bilinen tüm ergitme kaynak yöntemleriyle kaynak edilebilirler. Bu tür çeliklere, ilk olarak duplex paslanmaz çelik teller kullanılarak TIG kaynak yöntemi uygulanmış ve zaman içinde kaynakçılar duplex paslanmaz çeliklerde kazandıkları deneyimler ile süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin de kaynağında başarılı olduklarını görmüşlerdir. Bilindiği üzere, TIG kaynak yöntemi dolgu miktarı düşük olan bir yöntemdir ve yerini daha hızlı bir yöntem olan MIG kaynağına bırakmaktadır. Dolayısı ile boru hatlarının yapımında, işin yapım süresini kısaltmak açısından MIG kaynağı kullanımı artmış ve araştırmacılar bu yöntemde kullanılan elektrodlar üzerindeki çalışmaları yoğunlaştırmıştır. Öncelikle, duplex ve süperduplex paslanmaz çelik tel elektrodlar ile gerçekleştirilen MIG kaynaklı bağlantılarda doyurucu sonuçlar alınmıştır. Et kalınlığı büyük ve büyük çaplı boruların üretimi için de duplex paslanmaz çelik veya süperduplex paslanmaz çelik elektrodlar kullanılarak



Şekil 5. %2.5 Mo İçeren Özlü Tel İle Kaynak Edilmiş Tamamen Martenzitik Kaynak Metali Mikroyapısı (3).

Şekil 6. %1.5 Mo İçeren Martenzitik Kaynak Metalinde Katılaşan Ferritik (Beyaz) Faz (3).

Şekil 7. %2.5 Mo İçeren Martenzitik Kaynak Metalinde Ferritik/ Ostenitik Katılaşma Sırasında Oluşan Ferrit Fazı (3).

tozaltı kaynak yöntemi uygulanmış ve bu yöntemle de süpermartenitik paslanmaz çeliklerin iyi derecede kaynak edilebilirliği görülmüştür (1).

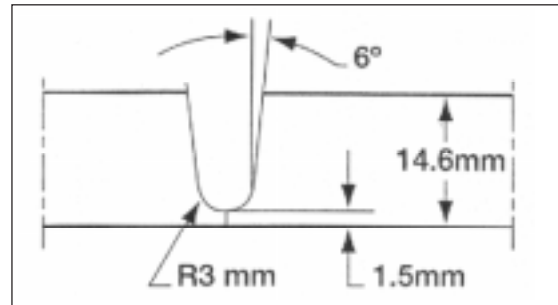
Duplex/ süperduplex paslanmaz çelik elektrodların kullanımı ekonomiklik (zira bu tür elektrodlar günümüzün en pahalı elektrodları grubundadır), kaynak metali mukavemetinin esas metal mukavemetine göre düşük olması ve kaynak sonrası ısı işlem uygulanmasının yetersizliği gibi etkenlerden dolayı araştırmacıları süpermartenitik paslanmaz çelik elektrodların geliştirilmesine yönlendirmiştir (1, 2).

Süpermartenitik paslanmaz çelik elektrodların geliştirilmesindeki ana neden; daha yüksek akma mukavemetine sahip kaynak dikişlerinin garanti edilmiş olması ve kaynak metalinin esas metal gibi kaynak sonrası ısı işleme uygun davranış göstermesidir. Dolayısı ile, süperduplex paslanmaz çelik kaynak metalinde oluşan gevreklik tehlikesi de ortadan kalkmaktadır. Diğer bir üstünlük de duplex paslanmaz kaynak metali ile karşılaştırıldığında süpermartenitik kaynak metalinin ısı genleşme katsayısının düşük olması ile çarpılma tehlikesinin en aza indirilmesidir (3).

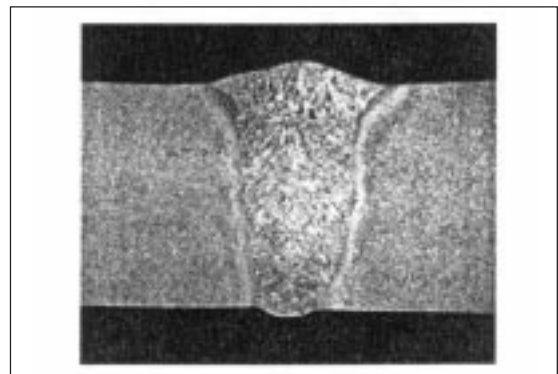
Süpermartenitik paslanmaz çeliklerin gazaltı ve tozaltı kaynağı uygulamaları için metal özlü teller geliştirilmiştir (4). Bu tür teller ile daha hızlı kaynak yapılabilme olanağı sağlanmış olup üretim hızı artırılmıştır. Süpermartenitik paslanmaz çelik özlü tellerin geliştirilme ve endüstriye uygulanması aşamasında yapılan araştırmalarda % 1.5 Mo' li çelikler için ve % 2.5 Mo' li çelikler için metal özlü teller geliştirilmiştir. Boruların çevresel kaynaklarında TIG ve MIG kaynak yöntemleri uygulanmıştır. Koruyucu gaz olarak TIG yönteminde Ar, MIG yönteminde ise Ar+ %0.5 CO₂ içeren gazlar kullanılmıştır. Daha çok miktarda CO₂ içeren gazlar kullanılabilmesine karşın kaynak metalindeki olası karbon ve oksijen artışının getirebileceği tehlikelerden dolayı CO₂ miktarı düşük tutulmuştur. Araştırmalarda 620°C' de 5 dk' lık bir son tav ısı işleminin sertliği düşürdüğü ve bağlantının mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür (3,4,5).

Süpermartenitik paslanmaz çelik boruların çevresel kaynak dikişlerinin gerçekleştirilmesinde üretim hızının artırılması ve daha ekonomik kaynak dikişlerinin oluşturulmasında çevresel dar aralık kaynak yönteminin kullanımı üzerine de araştırmalar yapılmıştır; zira bu yöntem uluslararası ve ulusal boru hatlarının yapımında yaklaşık olarak otuz yıldan bu yana uygulanan otomatik bir kaynak yöntemidir. Yöntemde kullanılan kaynak akım üreteçlerinin darbeli ark verecek şekilde olması gerekmektedir; zira, alışılmış sabit gerilimli akım üreteçleri kullanımı halinde yöntem optimum olarak kontrol edilememekte, aşırı sıçrıntı veya yetersiz nüfuziyet problemleri ortaya çıkabilmektedir. Bu açıdan daha gelişmiş kaynak akım üreteçlerinin kullanılması önerilmektedir (4).

Yapılan araştırmalarda, çevresel dar aralık J kaynak ağzı (Şekil 8 ve Şekil 9) kök aralığı bırakmadan kullanılabilmesi ve daha az elektrod tüketimi gerektirmesi açısından otomatik MIG kaynak



Şekil 8. Çevresel Dar Aralık J Kaynak Ağzı (4).



Şekil 9. Çok İyi Nüfuziyetli Çevresel Dar Aralık Kaynak Dikişi Kesiti (4). (14.6 mm Et Kalınlığındaki Boru Yaklaşık 14 Dk' da Kaynak Edilmiş ve Sadece Kapak Pasosu İçin Hafif Salınım Hareketi Verilmiştir).

uygulamalarında çok kullanılan bir ağız geometrisi olarak seçilmiştir. Kaynak sonrası elde edilen mekanik özellikler esas metalden daha yüksek değerlerde olup süpermartenzitik paslanmaz çelik elektrodların geliştirilmesinde ve kullanımının yaygınlaştırılmasında önemli bir adım olmuştur (4,5).

Süpermartenzitik paslanmaz çelik kaynak metalinin oksijen miktarının çentik darbe tokluğu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan araştırmalarda saptanmıştır. Kaynak dolgusundaki ppm seviyesinde ölçülebilen oksijenin bile çentik darbe tokluğunu etkilediği, bu açıdan araştırmalarda ve uygulamada daha düşük oksijen içeren gazların kullanımı önerilmektedir (5).

Süpermartenzitik kaynak metalinin en az kalıntı ostenit ve delta ferrit içeriğindeki bir mikroyapıya sahip olması önemlidir; zira her iki metalurjik oluşum da mekanik özelliklere zararlı etkide bulunmaktadır. Çok pasolu kaynak uygulamalarında bileşimin çok dikkatli kontrolü gerekmektedir. Bu açıdan da süpermartenzitik ek kaynak metaliyle ilgili saptama diyagramlarının kullanılmasında yarar vardır. Bu tür elektrodların kullanımında çok kısa süreli bir kaynak sonrası ısı işleminin bile ısıdan etkilenmiş bölgenin (IEB) mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür (3,4,5,8).

Süpermartenzitik (X80) ile süperduplex paslanmaz çelik borunun (UNS 32760) birbirine kaynak edilebilme uygulamaları da (farklı malzeme kaynağı) yapılmış olup Ni esaslı (SG- Ni Cr 23 Mo 16, ϕ 2 mm) tel ve süperduplex (EN 2072 G/W25 9 4 NL, ϕ 2 mm) tel elektrodlar kullanılmıştır. Bu araştırmada, normal kaynak ağızları açılmış ve kaynak işlemleri endüstriyel koşullarda gerçekleştirilmiştir. Ni esaslı tellerin kullanıldığı kaynak işlemlerinde pasolararası sıcaklık 100°C' nin altında ve ısı girdisi de 0.9- 1.1 kJ/mm olarak tutulmuştur. Süperduplex elektrod kullanılması halinde ise, biraz daha yüksek pasolararası sıcaklığa (en çok) 150°C ve 0.9- 1.2

kJ/mm' lik ısı girdisine izin verilmiştir. Ni esaslı kaynak dikişlerinin akma ve çekme mukavemetleri süperduplex kaynak metallerine nazaran hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda düşük değerler olarak elde edilmiştir. Tüm bağlantıların sertlik değerleri ise uygun seviyelerde bulunmuştur (5).

475 mm' den 760 mm çapa ve 30 mm et kalınlığına sahip süpermartenzitik paslanmaz çelik boruların üretiminde tozaltı kaynak yöntemiyle boyuna kaynak dikişleri kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan bir araştırmada, 508 mm çaplı 20 mm et kalınlığında 12Cr4.5Ni1.5Mo (X80) türü süpermartenzitik boru malzemesi kullanılmış, X kaynak ağızı açılarak ve kök paso 1.2 mm çaplı %1.5 Mo içeren metal özlü tel kullanılarak kök paso kaynağı plazma ark kaynağı ile tamamlanmıştır. Dolgu pasoları, 2.4 mm çaplı metal özlü tel ve buna uygun toz kullanılarak çift taraflı tozaltı kaynağı ile gerçekleştirilmiştir. Pasolararası sıcaklık, en çok 150°C olarak uygulanmış, tozaltı kaynağı için ısı girdisi 1.0- 1.7 kJ/mm olarak uygulanırken plazma ark kaynağında daha fazla ısı girdisi kullanılmıştır. Bağlantı 630°C' de 30 dk' lık kaynak sonrası ısı işleme tabi tutulmuş ve havada soğutulmuştur. Kaynak metalinin sertlik değeri 278 HV₁₀ ve ergime çizgisinde de maksimum sertlik 280 HV₁₀ olarak ölçülmüştür. Kaynak metalinin çentik darbe tokluğu ise -40°C' de ortalama 62J ile en düşük değerde ölçülmüştür (5).

SONUÇ

Uluslararası ve ulusal petrol veya doğalgaz boru hatlarının yapımında kullanılan ince taneli yapı çeliklerinden üretilmiş borulara alternatif olarak geliştirilen ve gelişmiş batı ülkelerinde hızla kullanıma giren süpermartenzitik paslanmaz çeliklerin dünya üzerindeki uygulamaları her geçen gün artış göstermektedir.

Mekanik özellikler ve korozyon dirençleri açısından ön plana çıkan bu tür çeliklerin kaynağında öncelikle

duplex ve süpermartenzitik paslanmaz süperduplex paslanmaz çelik elektrodların kullanımı planlanmış ve zaman içinde arzu edilen bağlantı özelliklerini sağlamak üzere yapılan araştırmalar sonucunda süpermartenzitik paslanmaz çelik elektrodların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu tür elektrodlar ile başarılı uygulamalar gerçekleştirilmiş olup geliştirilmesi için gereken çalışmalar halen devam etmektedir.

Ancak, üzücüdür ki, bu tür çelikler ülkemizde henüz tanınmamakta ve üzerinde endüstriyel bir uygulama alanının olmamasının yanı sıra bilimsel araştırmalar seviyesinde de kullanılmamaktadır. Bu bakımdan, bu tür çelikler üzerine araştırma yapılması ve bu araştırma sonuçlarının ülkemiz endüstrisine ve teknik literatürüne kazandırılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

1. **Van der Winden, H., Toussaint, P., Coudreuse, L.**, "Past, Present And Future of Weldable Supermartensitic Alloys", www.stainless-steel-world.net/supermartensitic/conference.asp
2. **Dhooge, A.**, "Supermartensitic Stainless Steel- on a Continuous Learning Curve", Heranews, March 2003, p. 5.
3. **Karlsson, L., Rigdal, S., Bruins, W., Goldschmitz, M.**, "Development of matching composition stainless steel welding consumables", Svetsaren, No:3, 1999, pp. 3- 7.
4. **Van den Broek, J., Goldschmitz, M., Karlsson, L., Rigdal, S.**, "Efficient Welding of Supermartensitic Pipes With Matching Metal Cored Wires", Svetsaren, No:2-3, 2001, pp.42- 46.
5. **Karlsson, L., Rigdal, S., van den Broek, J., Goldschmitz, M., Pedersen, R.**, "Welding of Supermartensitic Stainless Steels- Recent Developments and Application Experience", Svetsaren, No:2, 2002, pp.14- 20.
6. www.stainless-steel-world.net/supermarten/oilgas.asp
7. **Kvaale, P.E., Olsen, S.**, "Experience With Supermartensitic Stainless Steels in Flowline Applications", Stainless Steel World, KCI Publishing BV, 1999, The Netherlands.
8. **Marshall, A.W., Farrar, J.C.M.**, "Welding Of Ferritic and Martensitic 11-14%Cr Steels", Doc. IX-1975-00, IXH-494-2000.
9. Tube and Pipe Technology, www.read-tpt-com/butting.htm
10. (www.stainless-steel-world.net/supermarten/welding.asp)
11. **Folkhard, E.**, "Welding Metallurgy of Stainless Steels", Springer-Verlag, Wien, 1988.
12. **Kaluç, E., Tülbentçi, K.**, "Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği", Seminer Notu, KOÜ Kaynak Teknolojisi Araştırma, Uygulama ve Eğitim Merkezi, 28-29-30 Haziran 1995, Kocaeli, 244s.
13. **N.N.**, "Welding Handbook-Volume 4- Metals and Their Weldability", Seventh Edition, AWS, 1982, U.S.A.
14. **Avner, S.H.**, "Introduction to Physical Metallurgy", Mc Graw Hill, 1974, U.S.A.
15. **Carrouge, D.**, "Transformations in Supermartensitic Stainless Steels", Ph.D. Thesis, University of Cambridge, October 2002.
16. **Balmforth, M.C., Lippord, J.C.**, "A Preliminary Ferritic Martensitic Stainless Steel Constitution Diagram", Welding Journal, Vol. 77, 1998, pp. 1s- 7s.

**DAHA ETKİN
BİR ODA İÇİN
ÜYELİK
ÖDENTİLERİMİZİ
ZAMANINDA
ÖDEYELİM**