

SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZ (LNG) DEPOLANMASINDA KULLANILAN %9 Ni İÇEREN ÇELİKLER VE KAYNAK EDİLEBİLİRLİKLERİ

Emel TABAN*

Yrd.Doç.Dr.,
Kocaeli Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü,
41380 / Kocaeli
emelt@kocaeli.edu.tr

Erdiç KALUÇ

Prof.Dr.,
Kocaeli Üniversitesi,
Kaynak Teknolojisi Araştırma,
Eğitim ve Uygulama Merkezi,
41380 / Kocaeli
ekaluc@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Dünyada enerji gereksiniminin artmasıyla, doğal gazın çok hızlı biçimde büyüyerek 2010'lu yıllarda kömürden sonra ikinci büyük enerji kaynağı konumunu alacağı, dolayısıyla önümüzdeki yirmi yıl içinde doğal gaz tüketiminin iki kat artacağı beklenmektedir. Bu yüzden, doğal gazın uzak mesafelere taşınması ve büyük bir bölümünün de depolanması gereksinimi vardır. Büyük gaz miktarlarının küçük hacim kaplayacak şekilde taşınması ve depolanması ancak sıvılaştırılmalarıyla olanaklı olmaktadır. Doğal gazın sıvılaştırılması -163°C'de yapılabilmekte, bu nedenle oldukça düşük olan bu sıcaklıklarda sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) depolanmasını sağlayabilecek, tokluk ve mukavemet özelliklerini koruyabilecek olan %5-%9 Ni içeren çeliklere gereksinim gittikçe artmaktadır. Ülkemizde de bu tür çeliklerin kullanımının önümüzdeki yıllarda artacağı göz önüne alındığında kaynak edilebilirlik özelliklerinin iyi anlaşılması gerektiği ortadadır. Bu çalışmada, ülkemizde kullanımı gittikçe artacak olan %5-%9 Ni içeren ve LNG depolanmasında kullanılan çeliklerin üretimi, metalurjik ve mekanik özellikleri ve bu tür çeliklerin kaynak edilebilirliği açıklanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), %9Ni'li çelikler, sıfırlı sıcaklık uygulamaları, kriyojenik çelikler, soğukta tok çeliklerin kaynağı

9% Ni Steels Used in Liquefied Natural Gas (LNG) Storage and Their Weldability

ABSTRACT

The world energy demand is expected to grow, thus natural gas will grow fastest in 2010's and will overtake coal as the world's second-largest energy source and consequently gas consumption would double in the next twenty years. Handling and storage of natural gas is only rational by low temperature liquefaction. By liquefying natural gas at -163°C, its volume is reduced by a factor of more than 600 times thus making handling and storage easier and more economical. The need for weldable 5%-9%Ni steels for cryogenic applications remaining ductile and crack resistant at low temperatures and having high strength would increase in our country as well in the coming years. For these reasons, the weldability of these steels should be well understood. This paper will discuss the production, metallurgical and mechanical properties and weldability of the 5%-9% Ni steels that are expected to be increasingly used in LNG storage.

Keywords : Liquefied natural gas (LNG), 9% Ni steels, subzero temperature applications, cryogenic steels, welding of cryogenic steels

* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 05.12.2011
Kabul tarihi : 21.12.2011

1. GİRİŞ

Kriyogeni düşük sıcaklıklar fiziğidir. Düşük sıcaklıklarda gerçekleşen olayları oluşturmayı ve bunların uygulamalarını konu eden bilim dalıdır. Kriyojenik malzemeler maddenin statik ve çok düzenli haline olabildiğince yakındır. Aldığımız her solukta yaşayan hücreleri kaskatı donduracak kadar güçlü bir madde vardır. Bu havadaki temel bileşenlerden biridir ve normal olarak gaz halindedir. Sıvı halinde ise çok özel bir madde 'Kriyojen' haline gelir. Bilim, tıp ve sanayi zaman zaman çok düşük sıcaklıklara gereksinim duyar ve bunun da kolayca ve ucuz olarak elde edilmesi gerekir. Kriyojenik sıcaklıklar -273°C altındaki sıcaklıklardır ve en yaygın kriyojense sıvı azottur. Kriyojeni 1877'de doğduğu kabul edilir. Bu, oksijenin 90K'e kadar soğutulmuş sıvılaştırıldığı yıldır. 1895'te 40K'e ulaştığında havanın sıvılaştırılması ve ana bileşenlerine ayrılması olanaklı olmuştur, 1908'de helyum sıvılaştırılmıştır. Aşırı soğutulmuş metallerin çoğunun elektriğe karşı dirençlerini tümüyle yitirdikleri 1911'de keşfedilirken, 1920'lerde ve 30'lara gelindiğinde mutlak sifira yakın sıcaklıklara ulaşılmıştır [1].

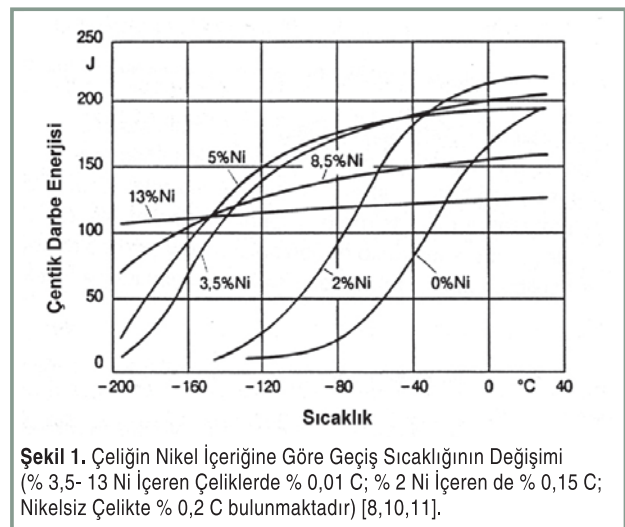
Dünya enerji gereksiniminin artmasıyla, doğal gazın çok hızlı biçimde büyüyerek 2010'lu yıllarda kömürden sonra ikinci büyük enerji kaynağı konumunu alacağı, dolayısıyla önümüzdeki yirmi yıl içinde doğal gaz tüketiminin iki kat artacağı beklenmektedir. Doğal gaz yataklarının bulunduğu ülkeler ve kullanıcı ülkeler arasında uzak mesafelerin olması örneğin doğal gazın çıkarıldığı yerler: Basra körfezi ülkeleri, Orta Asya, Alaska ve Kuzey denizi kıyıları, buna karşın tüketici ülkeler: Avrupa, Japonya, Kuzey Amerika'dır ve bu ülkelerdeki endüstrinin enerji gereksinimi her geçen gün artmaktadır. Bu yüzden, doğal gazın uzak mesafelere taşınması ve büyük bir bölümünün de depolanması gereksinimi vardır. Havayı ayrıştırarak elde edilen oksijen, azot ve argon gibi gazları

Tablo 1. Gazların Sıvılaşma Sıcaklıkları ve Düşük Sıcaklık Uygulamalarında Kullanılan Malzemeler [3,4,6].

| Gaz | Sıvılaşma Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) | Malzeme |
|---------------|--|---|
| Propan (LPG) | -42.1 ile - 45.5 | İnce taneli çelikler |
| Propilen | - 47.7 | %2.25 Ni çeliği |
| Karbondioksit | - 78.5 | % 3.5 Ni çeliği |
| Etan | - 88.4 | |
| Etilen (LEG) | - 103.8 | % 5- 9 Ni çeliği |
| Metan (LNG) | - 163 | |
| Oksijen | - 182.9 | |
| Azot | - 195.8 | Ostenitik paslanmaz çelikler %36 Ni- Fe (Invar) |
| Hidrojen | - 252.8 | |
| Helyum | -268.9 | Alüminyum alaşımları |

depolamanın ve taşımının en pratik ve en yaygın yollarından biri onları sıvılaştırmak ve bu şekilde depolamak ve taşımaktır. Örneğin doğal gaz (metan) -163°C 'de sıvılaştırılır ve hacmi 600 kat küçültülmüş olur. Bu sayede daha kolay taşınabilir, depolanabilir ve fiyatlarda kayda değer düşme sağlanır. Elbette kriyojenik sıcaklıklar dediğimiz -196°C , -183°C gibi oldukça düşük sıcaklıklarda sıvı olarak bulunan bu gazlar, ısı yalıtımı çok iyi sağlanmış ve bu sıcaklıklara dayanıklı malzemelerden yapılmış kaplarda depolanabilmekte ve taşınabilmektedir. Endüstrinin diğer gazlara olan istemleri dikkate alınır ise diğer sıvılaştırılabilen gazlar da sıfırlı sıcaklıklarda sıvı haldedirler, ve bu gazların taşıma ve depolama sorunları bulunmaktadır, Tablo 1, [1-5].

Sıvılaştırılmış doğal gaz, doğal gazın çıkarıldığı ülkelerden, kullanıldığı alanlara (deniz aşırı) iletilirken, özel donanımlı gemiler ve LNG terminallerinden faydalanılmaktadır. Oldukça büyük depolama kapasitesine sahip LNG terminalleri EEMUA, API 620 ve BS 7777'e uygun olarak üretilmektedir. Sıvılaştırılmış gazların taşınması ve depolanmasında kullanılan, borular, ekleme parçaları, vana, pompa ve tankların üretiminde kullanılan malzemelerin; çok düşük sıcaklıklarda iyi tokluk ve mukavemet özellikleri göstermesi, gevrek kırılmaya yol açmadan kaynak edilebilmesi ve kaynaklı bağlantının da esas metal özellikleriyle uyumlu olarak iyi düşük sıcaklık özellikleri göstermesi gerekmektedir. Üretim koşullarından dolayı azalan sıcaklıkla çeliklerin çekme mukavemetinde artma, buna karşın süneklik ve tokluklarında azalma görülür. Endüstride çok yaygın biçimde kullanılan ferritik iç yapılı çeliklerin çentik darbe mukavemetleri, geçiş sıcaklığı adı verilen belli bir sıcaklık derecesinin altında ani düşme gösterir ve gevrek davranış sergilerler. Bu sıcaklığın derecesi, çeliğin eldesinde uygulanan yöntem, alaşım elementlerinin tür ve miktarına, ısı işlem durumuna ve soğuk şekil değiştirme derecesine bağlı olarak değişir. Bu bakımdan



0°C'nin altındaki sıcaklıklardaki uygulamalarda, malzemeden beklenen en önemli özellik, basit bir biçimde çentik darbe deneyi ile saptanan tokluğunu kullanma sıcaklıklarında korumasıdır. Birçok gözetim ve denetim kuruluşları bu tür çeliklerin en düşük çalışma sıcaklıklarında ISO- V çentik darbe deneyinde, minimum 27J değerini vermesini öngörmektedir. Son yıllarda, çentik darbe deneyinin de özellikle aşırı düşük sıcaklıklarda yetersiz kaldığı görülerek çeşitli kırılma mekaniği deneyleri geliştirilmiştir [2-8]. Çeliklerde özellikle soğukta tokluk özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla bileşime katılan ostenitik yapıyı dengeleyici elementlerden nikel, önemli bir yere sahiptir. Zira nikel, ostenitik yapıyı dengelemekle kalmaz, A₃, A₁, M_s ve M_f sıcaklıklarını da düşürür ve geçiş sıcaklığının düşmesinde önemli katkı sağlar, hatta %13'ün üzerinde nikel katılması durumunda malzemede belirgin geçiş sıcaklığı gözlenmez, Şekil 1, yani malzeme sürekli olarak sünek özellik gösterir [1,9-13].

Bu çalışmada sıfırlı (kriyojenik) sıcaklıklar için geliştirilmiş nikelli çelikler, özellikle sıvılaştırılmış doğal gazın depolanmasında kullanılan %5-%9 Ni içeren çelikler ve kaynak edilebilirlikleri ele alınacaktır.

2. SIFIRALTI SICAKLIK UYGULAMALARI İÇİN GELİŞTİRİLEN ÇELİKLER

Çeliklerin düşük sıcaklıklarda tokluklarını kaybetmeden kullanılabilmesi için aşağıdaki özellikleri taşımaları gerekmektedir.

- Çelikte bulunan alaşım elementlerinin kontrollü olması: örneğin karbon miktarının en az düzeyde bulunması, çeliğin nikel ile alaşımlandırılması, çeliğe sıvı halde iken çok etkin bir gaz giderme işlemi uygulanmış olmalıdır, bunun yanı sıra gaz gidermede kullanılan alüminyum miktarı %0,05'den fazla olmaması, fosfor ve kükürt gibi katışkıların minimum düzeyde olması,
- Uygun ısıl işlem koşullarının sağlanması (normalizasyon tavlama veya ıslah etme) ve çeliğin tane yapısının rafine edilmesi- ince taneli olması istenir [6,8].

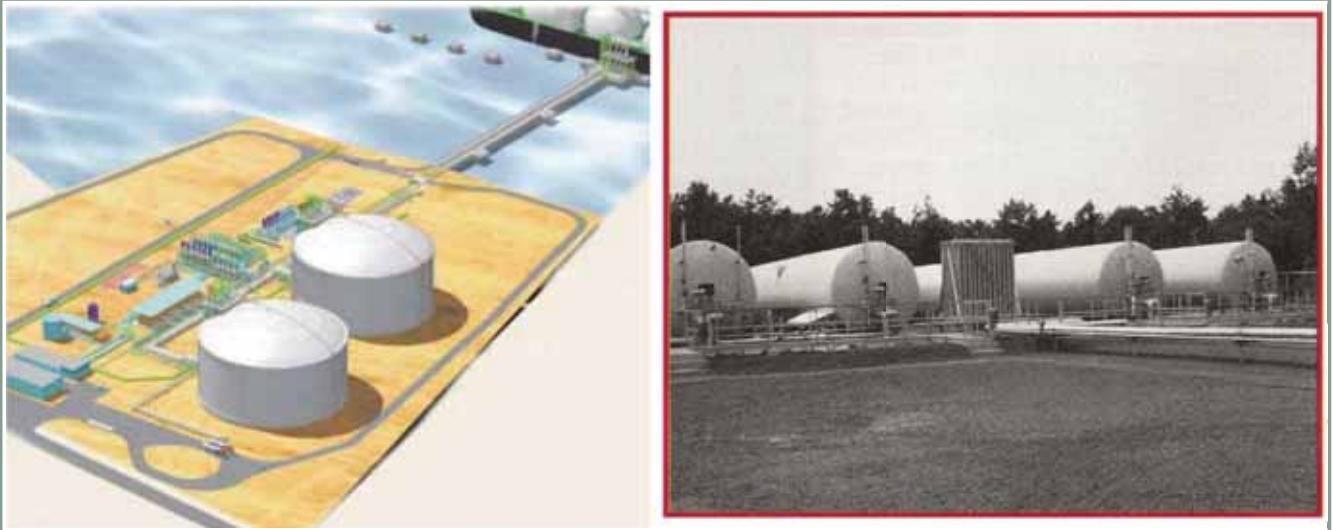
Günümüzde kullanma sıcaklığına göre çeşitli türlerde sıfırlı sıcaklık çelikleri ya da diğer bir deyimle soğukta tok çelikler geliştirilmiştir, bunlar kullanım sıcaklığına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- Az alaşımlı karbon manganlı düşük sıcaklık çelikleri ve ince taneli yapı çelikleri:
Normalize durumda -50°C'ye, ıslah edilmiş durumda ise -80°C'ye kadar olan çalışma sıcaklıklarındaki uygulamalarda kullanılır.
- % 1- %9 Ni içeren çelikler:
-80°C ile -200°C'ye kadar olan çalışma ortamlarındaki

Tablo 2. %9 Ni İçeren Çelikler İçin Uluslararası Standartlara Göre Alaşım İçeriği ve Mekanik Özellikler [4]

| Standart | Çelik | Tür | Kalınlık (mm) | Kimyasal Bileşim (%) | | | | | | | | Çekme Deneyi (MPa) | | | Charpy-V (enine) (J) | | Uzama (mm) |
|-------------------------|-------|--------|---------------|----------------------|--------|--------|------------|-------|-------|------|----------|--------------------|----------------|-----|----------------------|--------|------------|
| | | | | C | Si | Mn | P | S | Mo | Ni | V | R _e | R _m | A | -120°C | -196°C | |
| EN 10028- 4 | X8Ni9 | QT640 | ≤30 | ≤0,020 | ≤0,010 | ≤0,10 | 8,50- 10,0 | ≤0,05 | ≤0,01 | ≥490 | 640- 840 | ≥18 | - | ≥40 | - | - | |
| | | | >30 ≤50 | | | | | | | | | | | | | | |
| ASTM A553 ASME SA553 | X7Ni9 | Type 1 | ≤30 | ≤0,015 | ≤0,005 | ≤0,035 | - | - | - | ≥585 | 680- 820 | ≥20 | - | - | - | - | |
| | | | >30 ≤50 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | ≤50 | ≤0,035 | ≤0,035 | ≤0,035 | 8,50- 9,50 | - | - | ≥585 | 690- 825 | ≥20 | - | - | - | - | ≥0,38 |

Sac kalınlığı t ≤ 25 mm için deney sıcaklığı – 110°C ve 25 < t ≤ 30 için – 115°C dir.



Şekil 2. Nikel Alaşımli Çeliklerin Uygulama Alanları [3,7].

ekipmanların üretiminde uygulama alanı bulmaktadır. Bu tür çeliklerde nikel miktarı arttıkça tokluk özellikleri iyileşmekte ve geçiş sıcaklığı daha düşük sıcaklık derecelerine doğru kaymaktadır.

- Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler:

Yaklaşık -250°C sıcaklığına kadar tokluklarını korurlar ve geçiş sıcaklığı göstermezler. Aşırı düşük sıcaklıklardaki tokluk özelliğine ısıl işlemin, iç yapının (tane büyüklüğünün), gerilme durumunun etkisi önemli miktardadır. Bu tür çeliklerde ostenit çok düşük sıcaklıklarda dahi oldukça kararlıdır, yalnızca soğuk şekil değiştirme martenzit oluşumunu teşvik eder [1,8,10].

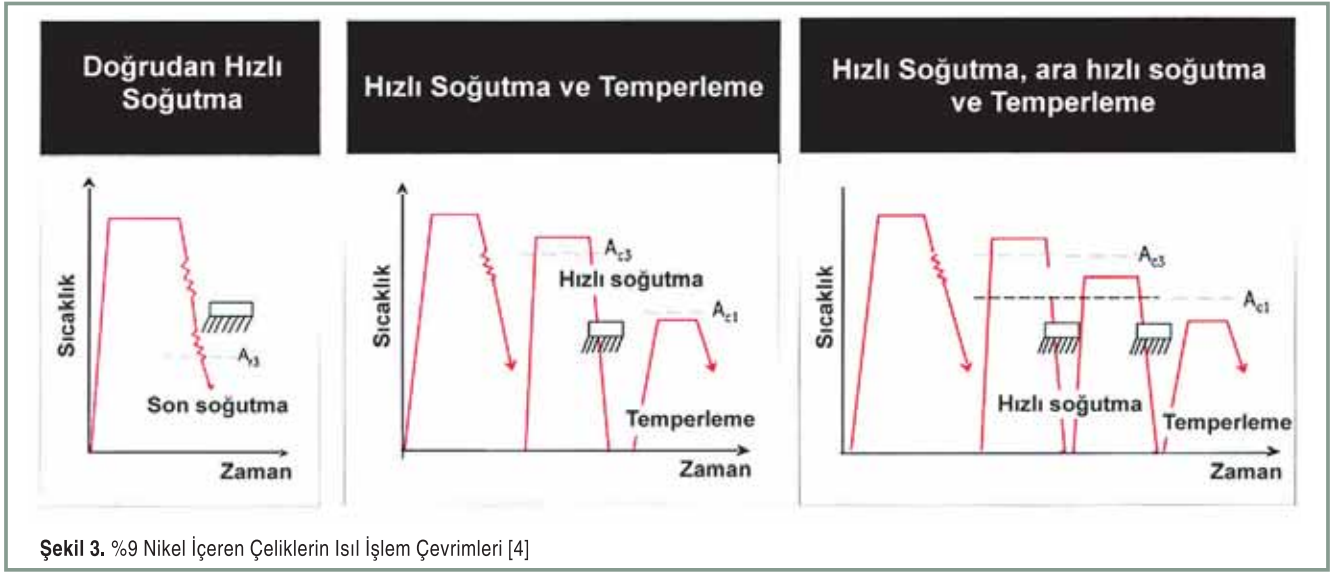
Sıfırlı sıcaklık uygulamaları için kullanılan nikel alaşımli çelikler, nikel içeriklerine bağlı olarak genellikle aşağıdaki gibi gruplandırılmaktadır.

- Düşük nikelli çelikler (%1-2.5 Ni),
- Orta nikelli çelikler (%3.5 Ni),
- %5 Ni içeren çelikler,
- %9 Ni içeren çelikler

Bu tür çelikler, nikel ile alaşımlandırıldıkları için metalurjik iç yapı değişim süreleri ve ıslah edilebilirlikleri etkilenmektedir. Dolayısıyla ince yapı olmaktadır. Bu nedenle, tokluklarında ortaya çıkan iyileşmenin yanı sıra, bu tür çeliklerde karbon, silisyum ve mangan gibi bünyede var olan elementler diğer az alaşımli çelikler ile aynı seviyede bulunmasına karşın mukavemet özellikleri artırılabilir. Nikel alaşımli soğukta tok çelikler, eski DIN 17280-“Soğukta tok çelikler, levha, bant, geniş yassı çelikler, profiller, çelik gruplar ve dövme parçalar için teknik teslim koşulları” ve EN 10028-4- “Nikel alaşımli soğukta tok

çelikler” olarak standartlaştırılmışlardır. Nikel alaşımli çelikler içinde özellikle, %9 Ni içeren çelikler sıfırlı sıcaklıklarda istenen yüksek tokluk özellikleriyle diğer mekanik özelliklerin iyi bir birlikteliğine sahiptirler. Bu çok iyi tokluk özellikleri, yüksek nikel içeriğinin yanı sıra ince taneli martenzit içeren optimize edilmiş bir yapının sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [1-4,9].

Soğukta tok nikel alaşımli çeliklerin bazı türlerini ve özelliklerini veren aşağıdaki tablo incelendiğinde de, %9 Ni içeren yüksek mukavemetli bu tür çeliklerin EN 10028-4'e göre X7Ni9 (1.5663); X8Ni9 (1.5662) veya ASTM/ASME A553 Type 1 standartlarına göre gösterimleri görülür. Özellikle LNG depolanmasında kullanılan bu tür çeliklerde güvenlik nedeniyle gevrek kırılma olaylarıyla karşılaşılması son derece önemlidir, yapılan araştırma geliştirme faaliyetleri sonucu son on yılda çelikten istenen tokluk özelliği artırılmış ve örneğin -196°C deney sıcaklığında 100 J'ün üstünde değerler elde edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Günümüzde tokluk değerleri olarak istenen -196°C 'de 100J değeri, 30 yıl önce bu tür çeliklerin kullanıldığı konstrüksiyonlardan istenen değerlerle kıyaslandığında bugünkü değerlerin geçmişe göre üç katına çıkarıldığını göstermektedir. 1970-1980'li yıllarda istenen değerler -196°C 'de (enine-boyuna numunelerde) 30-60J mertebelerindeyken 2000'li yıllardan itibaren 100J mertebelerine ulaşmıştır. Toklukta istenen bu yüksek değer, ancak özel ısıl işlemlerle elde edilebilmektedir. Bu çeliklerde karbon miktarının %0.15'ten düşük ve manganın %0.80'den düşük tutulmasına özen gösterildiğine ve ısıl işlem koşullarının spesifik olmasına dikkat çekilmektedir. Burada belirtilmesi gereken bir diğer konu da, bu tür çeliklerin fabrika ortamında üretilen ve düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılacak olan kazanların yapımında en ekonomik malzemeler olduğudur.



Şekil 3. %9 Nikel İçeren Çeliklerin Isıl İşlem Çevrimleri [4]

Ancak, bu tür çelikler “paslanmazlık” özelliğine sahip olmadıkları için argon gibi çökeltme ve kirlilik riski olan gazların depolanmasında kullanımı uygun bulunmamaktadır [4,6,7].

Bu tür çelikler bu konuda uzmanlaşmış çelik üretim tesislerinde özel bazik oksijen fırınlarında alaşımın daha iyi karışması ve daha iyi cüruf oluşumu sağlanarak üretilmektedirler. Ayrıca, potalarda yapılan işlemler ile fosfor ve kükürt seviyeleri en az seviyelere indirilerek tokluk özellikleri iyileştirilmektedir. %9 Nikel alaşımlı yüksek mukavemetli çeliklerde tokluk ve mukavemette en iyi kombinasyona fosfor içeriği yaklaşık %0.010, kükürt içeriği de %0.003'ün altında olduğunda erişilebilmektedir, buna karşın fosfor içeriği %0.05'in altında olduğunda tokluk açısından bir üstünlük olmamaktadır. Ayrıca, bu tür çeliklerde hızlı soğutmaya takiben uygulanan temperleme ısıl işleminin uygulanması yani diğer deyimle ıslah etme işlemi mekanik özelliklerin kontrolü için oldukça önemli etkenlerdir. Sertleştirme işleminden sonra yüksek nikel içeriğinin yanı sıra ince taneli martenzit bulunmaktadır. %9 nikel çelikler hızlı soğutmadan sonra artık ostenit içermektedirler. Sertleştirmeden sonra uygulanan temperleme prosedürü mikroyapıyı önemli ölçüde etkilemekte ve artan temperleme sıcaklığına bağlı olarak tokluk da artmaktadır. %9 Nikelli çeliklerde optimum temperleme sıcaklığı 600°C'dir. Şekil 3'te bu tür çeliklere uygulanan ısıl işlem çevrimleri verilmiştir [1,4,5,8,9].

Kriyojenik sıcaklıklarda bu denli yüksek kırılma tokluğunun üç faktörün fonksiyonu olduğu belirtilmektedir:

- Mikroyapıda kararlı artık ostenitin yaklaşık hacimce %10 mertebelerinde bulunması,

- Temperleme sırasında düşük karbonlu martenzitin olması,
- İnce taneli temperlenmiş martenzit ve ostenit adacıklarının oluşturduğu dubleks mikroyapı [13].

3. SIFIRALTI SICAKLIK UYGULAMALARINDA KULLANILAN %9 Ni İÇEREN ÇELİKLERİN KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİ

Bu tür çeliklerin başarılı olarak kaynak edilebilmeleri, kullanılacak çeliğin türü, üretim yöntemi ve teslim ediliş durumu, çelikte kalan mıknatıslık, ark üflemesine eğilim, ısıl iletkenlik, ısıl genleşme gibi fiziksel özellikler, uygulanacak kaynak yöntemi, kaynak ek metalleri, ısı girdisi ve soğuma hızı gibi birçok faktöre bağlı olmaktadır. %9 nikel içeren çeliklerde ark üflemesi yaratarak kaynak kalitesini etkileyecek özellikte artık mıknatıslanmaya eğilim sorunu bulunmaktadır. Bu duruma çok dikkat edilmesi gerekmektedir ve bunlar mıknatıslıkları alınmış durumlarında kaynak edilmelidirler. Bu tür çelikler sipariş verilirken EN 10201'e göre hazırlanmış malzeme sertifikalarının yanı sıra teslimatta üzerinde bulunacak artık manyetik alanı gösterir bir muayene sertifikasının da bulunması konusunda anlaşmaya varılmalıdır. Kaynak işlemini olumsuz olarak etkilemesi açısından özellikle borularda ve dış gövde panellerinde ortalama 1600 A/m (50 Oersted) artık manyetik alan değeri aşılmamalıdır. Taşıma, depolama ve diğer işlemlerde malzemenin tekrar mıknatıslanması engellenmelidir. Örneğin, bükme tezgahlarında kıvrırma, mıknatıslı vinçlerle taşıma, kesme ve akım kaçıran kaynak kablolarından etkilenmenin önüne geçilmelidir. Ark üflemesinin önlenmesi için tüm tedbirler alınmalıdır, ancak yapılabilecek fazla bir şey kalmadığında

Tablo 3. Sıfıraltı Sıcaklıklar İçin Kullanılan Ek Kaynak Metallerine Ait rnekler [12].

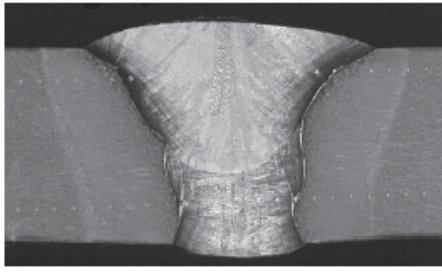
| Elektrot | Kaynak yöntemi | | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | W | Diğ er |
|----------------|-----------------------|----------------------|------|------|------|-------|-------|------|---------------|---------------|
| %9 Ni | W | SG-9Ni | 0.02 | 0.04 | 0.43 | - | 11.0 | - | - | - |
| Cr-Ni | E | E18 14 MnW B | 0.2 | 0.6 | 9.0 | 18.0 | 14.0 | - | 3.5 | - |
| | G,W | z.B. G18 14 MnW | 0.2 | 0.6 | 7.0 | 18.0 | 14.0 | - | 3.5 | - |
| | E | E20 16 3 Mn L B | 0.2 | 0.3 | 7.0 | 20.0 | 16.0 | 3.0 | - | 0.15N |
| | G,W | z.B. G20 16 3MnL | 0.2 | 0.4 | 7.0 | 20.0 | 16.0 | 3.0 | - | 0.15N |
| | S | S20 16 3 MnL | 0.04 | 0.4 | 7.0 | 19.5 | 16.0 | 2.7 | - | 0.12N |
| Nikel alaşımı | E | EL-NiCr 19 Nb | 0.03 | 0.4 | 5.0 | 20.0 | Kalan | - | - | 7Fe; 2.5Nb |
| | G,W | z.B. SG NiCr 20Nb | 0.02 | 0.2 | 3.2 | 20.5 | Kalan | - | - | 1Fe; 2.6Nb |
| | S | UP-NiCr20Nb | 0.02 | 0.3 | 3.8 | 17.5 | Kalan | - | - | 12Fe;2.1Nb |
| | E | EL-NiCr 15Mo6 | 0.06 | 0.4 | 3.5 | 14.5 | 65.0 | 6.5 | 1.2 | 8.5Fe; 1.2Nb |
| | E | EL-NiCr 20Mo9Nb | 0.03 | 0.4 | 0.8 | 22.0 | Kalan | 9.0 | - | 1.6Fe; 3.5Nb |
| | G,W | z.B. SG NiCr 21Mo9Nb | 0.02 | 0.2 | 0.2 | 22.0 | Kalan | 9.0 | - | 1Fe; 3.3Nb |
| | S | UP-NiCr21Mo9Nb | 0.02 | 0.3 | 1.3 | 21.0 | Kalan | 9.0 | - | 3Fe; 3.2Nb |
| | E | EL-NiMo16Cr16W | 0.02 | 0.1 | 0.5 | 15.5 | Kalan | 16.0 | 4.0 | 5Fe; 0,1V; 4W |
| G,W | z.B. SG NiMo 16Cr 16W | 0.01 | 0.05 | 0.5 | 15.5 | Kalan | 16.0 | 4.0 | 5Fe; 0,2V; 4W | |
| Cr-Ni (1.4316) | E | E 19 9 L B | 0.03 | 0.4 | 1.2 | 19.5 | 10.0 | - | - | - |
| | G,W | | | | | | | | | |
| | S | | | | | | | | | |
| | T | | | | | | | | | |
| Cr-Ni (1.4351) | E | E 19 9 Nb B | 0.05 | 0.4 | 1.2 | 19.5 | 10.0 | - | - | Nb |
| | G,W | | | | | | | | | |
| | S | | | | | | | | | |
| | T | | | | | | | | | |
| Cr-Ni (1.4453) | E | E 18 16 5 L B | 0.03 | 0.5 | 2.5 | 19.5 | 17.0 | 4.3 | - | N |
| | G,W | | | | | | | | | |
| | S | | | | | | | | | |

olanaklar lusnde alternatif akım kullanılmalı, modern kaynak akım reteleri kullanılmalı veya kaynak ağızları önerilen bir elektrod ile tampon pasosu yapılmalıdır. Bu tür çeliklere genel kaynak kurallarına uyularak örtülü elektrod ile ark kaynağı, tozaltı kaynağı ve MIG/MAG kaynak yöntemleri başarıyla uygulanabil-mektedir. Sıfıraltı sıcaklık uygulamalarında, tüm diğ er basınçli kap üretimlerinde olduğu gibi elektrik ark kaynağı yöntemleri alın birleştirmelerle uygulanır. Yapıda gerilme yığılmasına neden olabilecek nufuziyet azlığı, yanma oluğu, cüruf kalıntısı gibi kaynak hataları ile her tür çatlak ve dikiş kesilimlerinden kaçınılır. Genel olarak bu üretim dalında kullanılan ince sacların kaynağında ntav uygulanmaz, kesit kalınlařtıķa ve eliğ in karbon ieriğ i de % 0,20'yi aşınca bir ntav gerekebilir. Kaynakta düşük hidrojenli, iyi kurutulmuş bazik örtülü elektrodlar kullanılır. Kaynak metali hem istenen

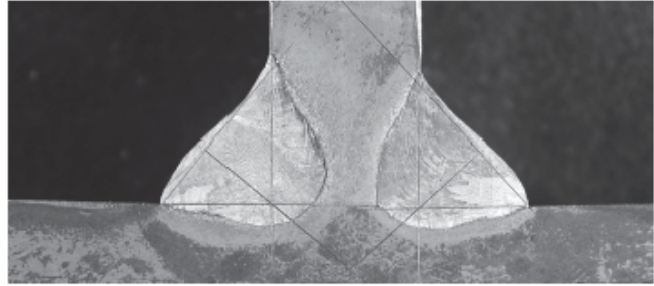
mukavemet özeliklerini hem de kullanma sıcaklığ ında gerekli tokluğu sağlayacak türde seçilir. Bu tür çeliklerin kaynağında en önemli konu IEB'de tane irileşmesine neden olmamak için ısı girdisinin en azda tutulması gerekliliğ idir. Kaynak sırasında ntav uygulanmış olsa dahi pasolararası sıcaklık 150°C'yi aşmamalıdır. Bazı durumlarda eliğ in türüne veya şartnameye göre yapının özeliklerini geliştirmek açısından gerilme giderme tavı öngörülmektedir, burada kesinlikle elik üreticisinin ngrdğu sıcaklık derecesi ve süre aşılmamalıdır. Kaynak işlemi, pozisyonler kullanılarak olabildiğ ince yatay oluk pozisyonunda yapılmalıdır; ancak bu pozisyonda hem ısı girdisi kontrol altında tutulabilir hem hatasız kaynak yapılabilir. Bu tür çeliklere tavan, korniş ve aşağ ından yukarı dik kaynak asla uygulanmamalıdır. Dik kaynağ ın kaçınılmaz olduğu durumlarda sadece yukarıdan aşağ ıya dik kaynak uygulanmalıdır [1-5,8-15].

Tablo 4. %9 Ni İçeren Çelikler İçin Kullanılan Kaynak Metali Bileşim Değerleri (% ağırlıkça) [2,3].

| Elektrod | C | Si | Mn | Cr | Mo | Nb | W | Fe | Ni |
|---|------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Örtülü Elektrod ile Ark Kaynağı Elektrodu (EN 14172) | | | | | | | | | |
| E Ni 6625 | 0.03 | 0.4 | 0.2 | 22 | 9 | 3.3 | - | 2 | Kalan |
| E Ni 6620 | 0.05 | 0.3 | 3 | 13 | 6 | 1.3 | 1.6 | 5 | Kalan |
| Gazaltı Kaynağı Teli (EN 18275) | | | | | | | | | |
| S Ni 6625 | 0.01 | 0.2 | 0.4 | 22 | 9 | 3.5 | - | 0.5 | Kalan |
| Tozaltı Kaynağı Teli/ Tozu (EN 18275/ EN 760) | | | | | | | | | |
| S Ni 6059/ SA AF2CrNiDC | 0.01 | 0.2 | 3 | 22 | 14 | - | - | 3 | Kalan |
| S Ni 6625/ SA AF2 DC | 0.02 | 0.2 | 0.8 | 20 | 8.5 | 3.5 | - | 2 | Kalan |
| S Ni 6625/ SA AF2CrNiDC | 0.01 | 0.2 | 1.5 | 21 | 8.5 | 3 | - | 2 | Kalan |



10 mm kalınlığında %9 Ni çeliği sacların tozaltı kaynağı (60° V-alın kaynağı)



10 mm kalınlığında %9 Ni çeliği sacların tozaltı kaynağı (çift taraflı iç köşe kaynağı)

Şekil 4. %9 Ni İçeren 10 mm Kalınlığında Sacların Tozaltı Kaynağı Uygulanmış Bağlantıların Makro Kesitleri [2,3]

%9 Ni içeren çelikler nikel içeren çelikler ailesinin üyesi olmakla birlikte 1940'lı yıllarda geliştirilmişlerdir. İlk geliştirilen alt türler düşük nikel içeren (%3.5 ve %5)

**Şekil 5.** %9 Ni İçeren Çeliklerin Kaynak Uygulamasına Örnek [3]

çeliklerdir ve 1947 yılından itibaren de %9 Ni içeren çelikler geliştirilmektedir. %9 Ni içeren çelikler, pahalı olmalarına karşın, mukavemet değerlerinin yüksekliği nedeniyle kesitlerin azaltılmasına olanak sağladığından, çoğu kez diğer türlere göre daha avantajlı bir konuma sahiptirler. Bu çelikler, düşük sıcaklıklardaki yüksek tokluklarını, uygulanan özel ısıl işlemler (çift normalizasyon veya ıslah) sonucunda kazanmaktadır. Bunların kaynağında yüksek nikelli ostenitik elektrodlar (Tablo 3 ve 4) kullanılabilirliği gibi, nikel esaslı, Inconel türü elektrodlar da çok iyi sonuçlar vermektedir. Bu yüksek nikel içerikli elektrodlar, fiyatlarının pahalılığına karşın yüksek mukavemetlerinden ötürü, tüm nikelli çelikler için önemle önerilmektedir. Bu tür çeliklere, kaynak sonrası, gerileme giderme tavı uygulaması durumunda, tav sıcaklığı 570°C'yi aşmamalıdır; zira bu çeliklerin Ac sıcaklığı 600°C civarındadır. Proses gereği, ısıtma ve soğutma işlemlerinin aynı reaktörde yapıldığı durumlarda, kaynaktaki özellikle ostenitik paslanmaz çelik elektrodlar kullanılmamalıdır. Zira, kaynak metali ve esas metal arasındaki ısıl genleşme farkı sorun yaratmaktadır [1-9,12-14].

%9 Ni içeren çeliklerin kaynağına başlamadan önce, kaynak dikişine bitişik bölgede ve kaynak ağızlarında bulunabilecek, haddeleme veya ısıl işlemden kaynaklanan bütün tufal ve oksit tabakası çok iyi bir biçimde temizlenmektedir. Özellikle nikel esaslı kaynak metali kullanılması halinde gözenek oluşunun önlenmesi açısından bu konu çok önemlidir [5,6,8].

%9Ni içeren çeliklerin kaynaklı bağlantılarında ışıdan etkilenmiş bölgelerinde, özellikle iri taneli ışıdan etkilenmiş bölgede mekanik özelliklerde düşme görülür, zira bu bölge tamamen ostenitize olmakta ve tane büyümesi belirgin Şekilde artmaktadır Dhooge vd. IEB darbe zelliklerinin 600°C'de kaynak sonrası ısıl işlemi takiben yapılacak hızlı soğutma sayesinde iyileştirilebileceğini önermektedirler [13,14].

Bu tür çeliklerin daha önceden de belirtildiği üzere çok kuvvetli mıknatıslanma özeliği vardır; bu özelik, kaynak sırasında arkın Őiddetli bir biçimde üflenmesine neden olur. Günümüzde bu önemli konunun etkisini ortadan kaldırmak için alternatif akım ile de kullanılabilen Ni esaslı elektrodlar geliştirilmiştir. Parça kalınlığına ve bağlantının kaynak sırasındaki zorlanma derecesine göre, bu tür çeliklere kaynaktan önce 80-200°C'lik bir ntav uygulanır [5,6,8].

4. SONUÇ

Özellikle sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) depolanmasında, kriyojenik sıcaklıklarda kullanım alanı bulan %9 Ni içeren çelikler, ülkemizde yeni yeni tanınmaktadır. Enerji gereksinimlerindeki artış ve doğal gazın kullanım alanlarının artmasıyla birlikte ilerleyen yıllarda bu tür çeliklere olan istem de artacaktır. Ülkemizde bu tür çeliklerin kullanımının yaygınlaşması, kaynak edilebilirlik özelliklerinin iyi anlaşılıp, doğru uygulanmasına da bağlı olacaktır. Düşük sıcaklıklarda kullanılan çeliklerin kaynağında en yaygın yöntemler örtülü elektrod ile ark kaynağı ve tozaltı kaynak yöntemleri olmaktadır. Son yıllarda ısı girdisini kontrol altında tutan darbeli akım gazaltı kaynak yönteminin geliştirilmesi bu yöntemin, özellikle zl elektrodlar ile uygulama alanını genişletmiştir. Bu alışma, %9 Ni içeren çeliklerin özellikleri ve kaynak edilebilirliklerinin ülkemiz literatürü ve endstirisine aktarmayı amaçlamıştır.

KAYNAKÇA

1. **Taban, E., Kaluç, E.** 2011. Sıfırlatı Sıcaklık Uygulamalarında Kullanılan elikler ve Kaynak Edilebilirlikleri, Gedik Eğitim Vakfı, Uluslararası Kaynak Mühendisliği Eğitimi Ders Sunumu, İstanbul.

2. **Karlsson, L., Rigdal, S., Thalberg, N., Stridh, L.E.** 2005. Developments in Welding of 9%Nickel Steel for LNG Applications, Schweissen und Schneiden Lectures from the English Sessions of DVS Annual Welding Conference, Band 237-E, pp. 43- 48, Essen- Germany.
3. N. N. 2010. Welding Liquid Natural Gas Tanks and Vessels in 5% and 9% Nickel Steels, ESAB Catalogue.
4. **Hickmann, K., Kern, A., Schriever, U., Stumpfe, J.** 2009. Production and Properties of High- Strength Nickel- Alloy Steel Plates for Low Temperature Applications, <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/LINK/95.pdf>.
5. **Kalu, E., Taban, E.** 2009. Sıfırlatı Sıcaklık Uygulamalarında Kullanılan elikler ve Kaynak Edilebilirlikleri, Gedik Eğitim Vakfı, Uluslararası Kaynak Mhendisliği Eğitimi Ders Notları, Blm 2, 2.13, GEV ATB, İstanbul.
6. N. N. 1987. Guide to the Welding and Weldability of Cryogenic Steels, Document IIS/IIW- 844- 87, TWI, Abington- UK.
7. **Avery, R., Parsons, D.** 1995. Welding Stainless and 9%Ni Steel Cryogenic Vessels, Werlding Journal, November, p. 45-50.
8. **Anık, S., Tlbenti, K., Kalu, E.** 1991. rtl Elektrod ile Ark Kaynağı, Gedik Holding Yayını, İstanbul.
9. N. N. 2010, Weldability of Low Alloyed Steels For Low Temperature Application, Istituto Italiano della Saldatura, International Welding Engineering Lecture Notes, Italy.
10. **Von Boese, U., Werner, D., Wirtz, H.** 1984. Das Verhalten der Staehle beim Schweissen-Teil II: Anwendung, Band 44-II, D.V.S., Düsseldorf- Deutschland.
11. **Bargel, H.J., Schulze, G.** 1995. Malzeme Bilgisi- Cilt II, evirenler: Ő. Gle, A. Aran, İT Makina Fakltesi Ofset Atlyesi, İstanbul.
12. N. N. 2002. Dşk Sıcaklık Uygulamalarında Kullanılan Nikel alaşımlı Yapı elikleri I/II, ODT Kaynak Mhendisliği Eğitim Notları, Ankara.
13. **DuPont, J., Lippold, J.C., Kiser, S.D.** 2009. Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys, John Wiley & Sons, Inc, 456 pages.
14. **Dhooge, A., Provost, W., Vinckier, A.** 1982. Weldability and Fracture Toughness of 9% Nickel Steel, Part 1 - Weld Simulation Testing, Part 2- Wide Plate Testing, Welding Research Council Bulletin No. 279.
15. **Anık, S., Dorn, L.** 1995. Schweiseseignung Metallischer Werkstoffe, Band 122, DVS, Düsseldorf- Deutschland.