

DOĞALGAZ ve PETROL BORU HATLARINDA HİDROJENİN NEDEN OLDUĞU ÇATLAMALAR

A.Kadir UYSAL, Nurhan CANSEVER

Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul /TÜRKİYE

ÖZET

Doğal gaz ve petrol boru hatları ülkemizde ve dünyada stratejik öneme sahip enerji kaynaklarının iletiminde kullanılmaktadır. Dünyada enerji iletim hatlarının yaklaşık %70'i boru hatlarıyla taşınmaktadır. Boru hatlarıyla aynı zamanda LPG, anhidrat amonyak, ham petrol, gazolin ve diğer rafine edilmiş petrol ürünleri gibi çok çeşitli tehlikeli sıvılar da taşınmaktadır. Boru hatlarında meydana gelen hasarlar hava, göl ve nehir kirliliğinden, insanların yaralanmasına ve hayat kayıplarına kadar bir çok ciddi hasarlara sebep olmaktadır. Bundan dolayı boru hattı hasarları çok kritik ve tehlikelidir.

Bu makalede doğal gaz ve petrol boru hatlarında servis koşullarında meydana gelen hidrojen nedenli çatlama (HIC) hasarına ait nedenler, oluşum mekanizmaları ve boru hatlarında kullanılan çeliklerin bu hasar türüne karşı direncini tespit etmek için kullanılan standart test metotlarını belirtmek ve bu hasarın tahribatsız muayene yöntemleriyle tespitiyle meydana gelmesini önleyerek boru hatlarının servis performansını artırmak için alınması gereken başlıca tedbirlerin belirtilmesi amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hidrojenin neden olduğu çatlama, boru hatları

ABSTRACT

Oil and gas pipelines are used to convey energy sources which have strategical importance in our country and the world. Approximately 70% of energy transmission in the world is being carried out by pipelines. Pipelines also transport a variety of hazardous fluids, including natural gas, LPG, anhydrous ammonia, crude oil, gasoline and other refined petroleum products. As a result, pipeline failures can have a number of serious consequences ranging from pollution of the air, lakes and rivers, property damage, personal injuries and loss of life. Therefore pipeline failures are very critical and dangerous.

This article aims to explain the causes and mechanisms of hydrogen induced cracking failure, which occurs in service conditions of natural gas and oil pipelines. Also standard HIC test methods are described which are used to determine the resistance of the steels used in pipelines and non destructive test methods are stated which are used in detection of HIC cracks. Finally preventive actions are explained, which should be taken for eliminating HIC cracking and increasing the service performance of the pipelines.

Keywords: Hydrogen induced cracking (HIC), pipelines

1. GİRİŞ

Ulusal Korozyon Mühendisleri Kurumu (NACE) tarafından yayınlanan malzeme gereksinimleri (MR 0175) standartında, sıvı olarak su ve kısmi basıncı 0.0035 bar'dan büyük hidrojen sülfid (H_2S) içeren akışkanları asidik (sour) gaz ortamı olarak tanımlar. Boru hatlarında taşınan doğalgaz ve petrol gibi akışkan sıvılar da içerdikleri H_2S nedeniyle asidik korozif ortam içerirler. Bu nedenle doğalgaz ve petrol boru hatları da korozif ortamlarda çalışmaktadır.[1]

Boru hatlarında H_2S den kaynaklanan en yaygın çatlama tipi HIC çatlama tipidir ve aynı zamanda merdiven adımı çatlama (SWC) olarak bilinir.[3] HIC, 1940 lardan beri asidik ürünleri tutan tank ve kaplardaki bir problem olarak tanımlandığından hidrojen kabarcığı ile ilişkilendirilmiştir.[9]

1972 de İran körfezindeki gaz iletim boruhattındaki hasar ve 1974 yılında Suudi Arabistan'daki üç gaz iletim hattında meydana gelen hasarlarının sonucunda, birçok firma çeşitli çeliklerdeki çatlama ve ortaya çıkan test sonuçlarını araştırmaya başlamıştır.

HIC terimi, 1973 den beri dünya çapında araştırmacıların dikkatini artarak çeken, hasarla ilişkili bir olgu olarak uzun zamandır bilinmekteydi. 1975 – 1980 arasındaki 5 yıllık kısa bir sürede bu konuda 50 den fazla makale yayınlandı. HIC terimi ilk olarak Miyoshi, Tanaka, Terasaki ve Ikeda, adlı araştırmacıların "Hydrogen-Induced Cracking of Steels Under Wet Hydrogen Sulfide Environment" isimli makalelerinde kullanılmıştır.[1] Merdiven adımı çatlama (SWC), hidrojen çatlama (HC) ve hidrojen nedenli merdiven adımı çatlama (HISWC) gibi aynı kavramı göstermekte olan terimler de literatürde bulunmaktadır. HIC (hydrogen induced cracking) terimi literatüre NACE TM 0284 no'lu standart tarafından adapte edilmiştir.[9]

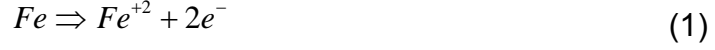
Boruhatlarında meydana gelen korozyon hasarları içerisinde HIC çatlak hasarına en güncel örnek 1765 km uzunluğundaki Bakü-Tiflis-Ceyhan (BTC) petrol boruhattından verilebilir. BTC boruhattı Hazar denizindeki petrol sahalarından Türkiye'nin Akdeniz kıyısındaki petrol terminali Ceyhan ile arasındaki stratejik bağlantıyı sağlar. Boruhattının yapımı Azerbaycan, Gürcistan ve Türkiye olmak üzere üç farklı lota bölünmüştür. 300 Milyon USD lik Gürcistan lotu, boruhattının merkezi kısmı olup çeşitli kalite ve et kalınlıklarında $\varnothing 1168$ mm'lik 248 km çelik borudan oluşmaktadır. İnşaat safhasında hidrojenin neden olduğu çatlama problemi tespit edilmiş ve yaklaşık 200 tane çevresel kaynağın değiştirilmesi gerekmiştir.[10]

2. HİDROJEN NEDENLİ ÇATLAMA (HIC)

Çelik boru hatlarında hidrojenin kaynağı rutubetli H₂S'dür. Bu bakımdan, metaldeki hidrojen absorpsiyonunun iki karakteristik reaksiyonu vardır.

Birincisi asidik gaz içeren ortamlardaki elektrokimyasal korozyonun tipik bir reaksiyonudur.

- Anotta gözlemlenen reaksiyon,



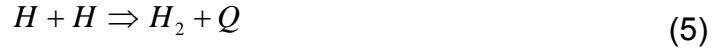
- Katottaki reaksiyon;



Bu durumda, hidrojen iyonları hidrojenin sülfürün ayrışmasından ortaya çıkmıştır.



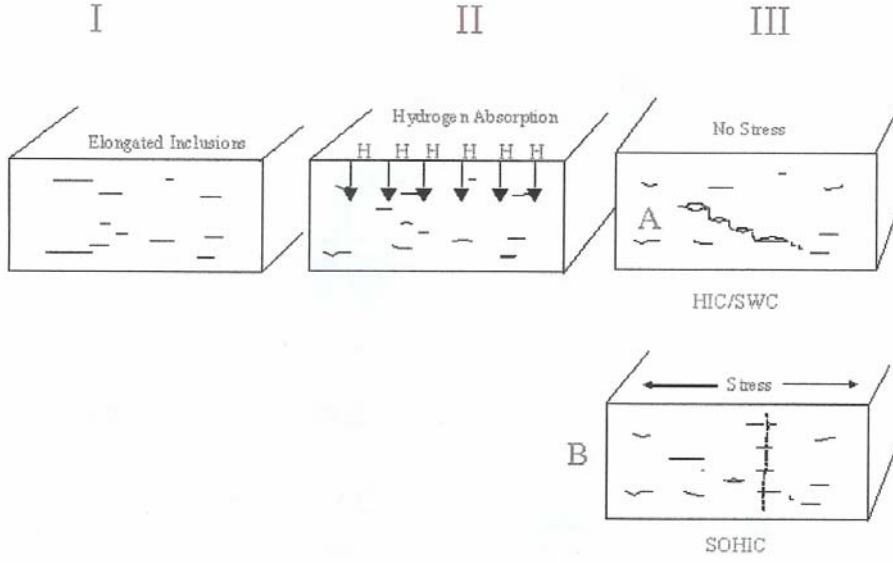
2 no'lu reaksiyonda görülen hidrojen çıkışı enerji olarak tercihli bölgelere difüze olur ve aşağıdaki reaksiyona göre moleküler H₂'e yeniden birleşir.



Bu sırada ortaya çıkan Q enerjisi, inklüzyon etrafında lokal gerilmelerde artışa yol açar. Eğer muakevemet aşılsa, daha sonra HIC çatlakıyla sonuçlanır.[2]

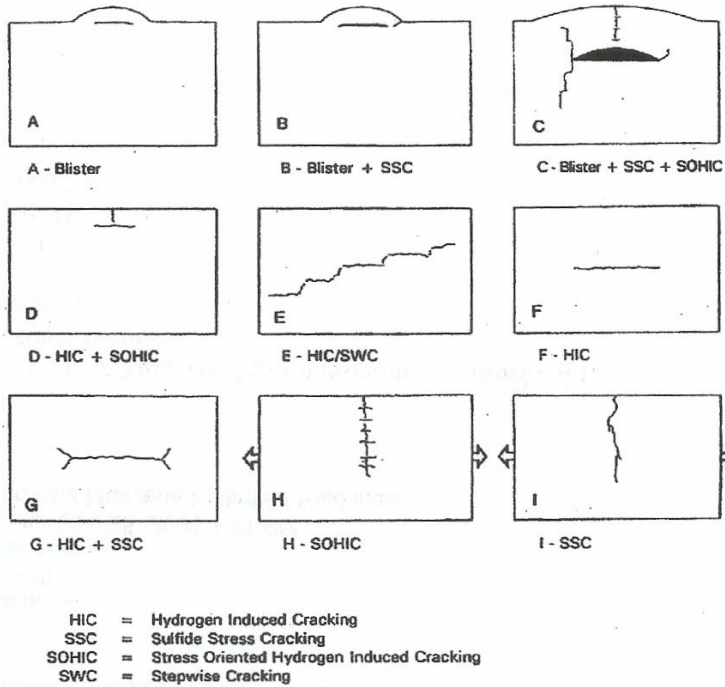
Hidrojen atomlarının çelikte en yaygın olarak uzamış mangan sülfid (MnS) inklüzyonları gibi düzlemsel süreksizliklerde toplanmasından kaynaklanır. Toplanmış atomlar hidrojen gazı oluşturmak üzere reaksiyona girerler, reaksiyonla aynı zamanda basınçta büyük bir artış meydana gelir. Eğer hidrojen yüzeye yakın süreksizliklerde toplanırsa, bu hidrojen kabarcıklanmasına (hydrogen blistering) yol açar.

Eğer hidrojen yüzeyden daha içerde toplanırsa, çeliğin haddeme yönü boyunca paralel, kalınlık yönünde çaprazlamasına (merdiven basamağı gibi) yönde çatlakların oluşumuna neden olur. Bu tipte çatlama gerilimden bağımsızdır. Şekil 1 de HIC çatlakları şematik olarak gösterilmektedir.[3]



Şekil 1. Hidrojen nedenli çatlama (HIC) / Merdiven adımı çatlaması (SWC) ve gerilme yönlenmeli hidrojen nedenli çatlama (SOHIC) neden olan hidrojen absorpsiyonu.[3]

Bununla birlikte sulu H_2S içeren doğal gaz ve petrol boru hatlarında hidrojenin neden olduğu diğer çatlak türleri de Şekil 2 de gösterilmektedir.



Şekil 2. Hidrojenin neden olduğu diğer çatlak türleri.[3]

3. HİDROJEN NEDENLİ ÇATLAK (HIC) TESTLERİ

3.1 HIC Testi Standartları

Petrol ve gaz sahasındaki metalik bileşenlerin ani hasarlanma sonuçları ve onların H₂S içeren üretim sıvılarına maruz kalmaları, NACE MR 0175'in ilk baskısının 1975 yılında hazırlanmasına yol açmıştır.

NACE MR 175'in orjinal ve sonraki baskıları sürekli bahsedilen sülfürlü gerilim çatlama (SSC) karşı ön tedbir olarak H₂S kısmi basıncının limitlerini koymuştur. Bu standart aynı zamanda, H₂S kısmi basıncı eşik değerini aştığında, SSC dirençli malzemelerin spesifikasyonu ve seçimi için rehberlik sağlamıştır. Daha sonraki baskılarda, NACE MR 0175 bazı korozyon dirençli malzemeler için de çevresel bileşim, pH, sıcaklık ve H₂S kısmi basıncı terimleri altında uygulama limitlerini belirlemiştir. NACE MR 0175 standardı, TM 0177 ve TM 0284 ile tamamlanmıştır.[7]

NACE TM 0284 no'lu standart, boruhattı çeliklerinin tutarlı bir şekilde değerlendirilmesi için test koşullarının standart olarak kurulması ve farklı laboratuarlardan gelen test sonuçlarının karşılaştırılmasını sağlamak amacıyla ilk olarak 1984 yılında hazırlanmıştır. Bu standart, HIC için ilk olarak hazırlanan ve en geniş çapta kullanılan standarttır.[9]

Öte yandan, Avrupa Korozyon Federasyonu (EFC) 1995 yılında EFC No:16 ve 1996 yılında EFC No:17'yi yayınlamıştır. Bu dökümanlar kapsam ve detay olarak farklı olmasına rağmen NACE standartlarını tamamlayıcı özelliktedir.

NACE ve EFC'nin ortak çalışmasıyla, ISO 15156'yı hazırlamak için ISO/TC 67 ye bağlı 7 no'lu çalışma grubu şekillenmiştir. Bu çalışma grubu H₂S içeren şartlardaki metalik malzemelerin çatlama dirençleriyle ilgili olan saha tecrübelerinin ve laboratuvar test bilgilerinin toplanması ve gözden geçirilmesi ve uygun olduğu ölçüde yayınlanmasına olanak sağlamıştır.

Bu çalışmalar neticesinde ISO 15156-1 Petrol ve Doğal Gaz Endüstrisi – Petrol ve gaz üretiminde sulu H₂S içeren ortamlarda malzeme kullanımı başlığı adı altında 2001 yılında yürürlüğe girmiştir.[7]

3.2 HIC Testi Koşulları

Korozif servis ortamları için kullanılması amaçlanan hat borusu çeliklerinin uygunluğu standardize edilmiş HIC testleri ile kanıtlanmaktadır. NACE TM 0284 no'lu standart, test malzemelerinin HIC çatlama dirençlerinin ölçülmesi için en geniş çapta kullanılan standarttır.

Boruhattı ve basınçlı kap plaka çeliklerinin sulu sülfürlü korozyon ortamından hidrojen absorpsiyonu ile gerçekleşen HIC çatlama karşı direncinin değerlendirilmesi için bir test metodu kurmuştur. Şekil 3 de NACE TM 0284 de belirtilen HIC testi düzeneği şematik olarak gösterilmektedir. [9]

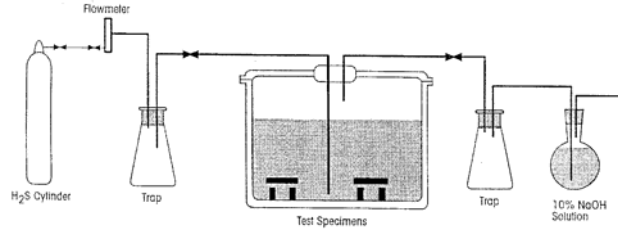


FIGURE 1
Schematic diagram of typical test assembly

Şekil 3. Hidrojen nedenli çatlama (HIC) testi düzeneğinin şematik görünümü.[9]

Çizelge 1'de ISO 15156-2 de HIC/SWC için verilen test prosedürü ve kabul kriteri değerleri görülmektedir.[8]

Çizelge 1. Hidrojen nedenli çatlama (HIC) / Merdiven Adımlı Çatlama (SWC) test prosedürü ve kabul kriteri.[8]

| Ürün Tipi | Uygulanan Gerilme | Ortam Koşulları | H ₂ S kısmi basıncı | Kabul kriteri | Kalifikasyon Geçerliliği |
|--|-----------------------|---|--|---|---|
| Düz haddelenmiş çelikler veya onların ürünleri a, b | Uygulanan Gerilme Yok | NACE TM0177 Solüsyon A (%5 NaCl + %0.5 CH ₃ COOH) ^c | 100 kPa (15 psi) ^c | CLR ≤ 15 % CTR ≤ 5 % CSR ≤ 2 % | Her asidik ortam için |
| | | %5 NaCl + %0.4 CH ₃ COONa, pH istenen değere ayarlanır (HCL ve NaOH kullanılarak) ^d | Tasarlanan uygulamaya uygun ^d | Çatlamaya müsaade edilmez. ^g | Spesifik veya daha az şiddetli ortamlar için ^f |

a- dikişsiz silindirik ürünlerin kalifikasyonu da uygun olabilir

b- ürünün genel performansını temsil etmek üzere alınacak numuneler üretici ve alıcı arasında anlaşıldığı gibi olmalıdır.

c- test ortamının tasarlanan uygulama için yeterli şiddette olup olmadığı kullanıcının sorumluluğundadır.

d- Uygulamaya spesifik testler için yeni veya varolan kurulumlarla gerçekleştirilebilir. Böyle testlerde standart 96 saatten daha uzun süreler ekipman kullanıcısının opsiyonunda uygulanabilir.

e- ekipman kullanıcısının insiyatifinde, metalurjik kesitlerin lokasyonlarının seçilmesinden önce çatlakların bulunması ve değerlendirilmesi için test numunelerinin ultrasonik değerlendirmesi uygulanabilir.

f- Bkz. ISO 15156-1 Bölüm 5 plastik dizayn kriteri kullanarak dizayn bilgisi ile ilgili

g- ekipman kullanıcısının yazılı onayına istinaden diğer kabul kriteri de kullanılabilir.

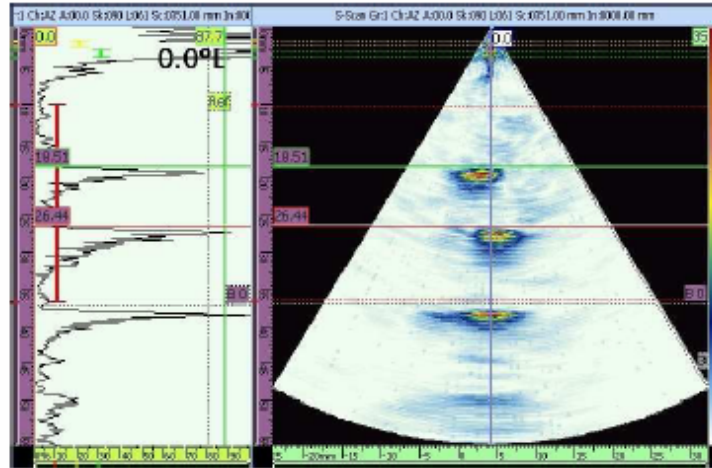
4. HIC ÇATLAKLARININ TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİYLE (NDT) TESPİTİ

HIC'nın tespiti konusunda tahribatsız muayene yöntemleri makrografik ve mikrografik muayene yöntemleri gibi tahribatlı testlerin yerini almaya başlamıştır.[5] Daha önceki yıllarda yayınlanan test standartlarında HIC çatlaklarının değerlendirilmesinde tahribatlı yöntemler kullanılması tek başına yeterli görülürken özellikle son yıllarda tahribatsız muayene cihaz ve tekniklerinde yaşanan teknolojik gelişmelere paralel olarak HIC çatlak değerlendirmesinin de tahribatsız muayene yöntemleri ile birlikte yapılması önerilmektedir.

HIC çatlak test numunelerinin değerlendirilmesinde manyetik tanecik test, darbe-yankı veya daldırma metoduyla ultrasonik muayene gibi yaygın olarak bilinen yöntemleri kullanılmakta iken servis koşullarında ise akustik emisyon tekniği, kumanda kontrollü gözle muayene ve grup yayılım (phased array) tekniği ile HIC'nın tespiti yapılmakta ve bu alanda yapılan çalışmalar literatüre kaydedilmektedir.

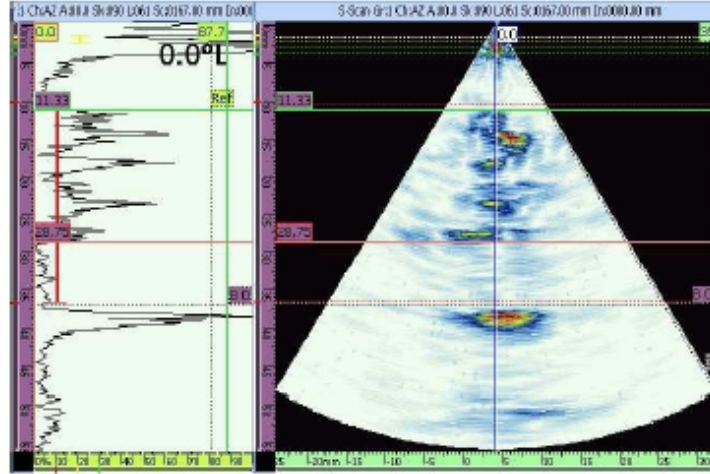
Bu yöntemlerden grup yayılım (phased array) tekniği kullanılarak yapılan HIC tespitine örnek uygulama aşağıda yer almaktadır.

HIC çatlağının, hidrojenin çelik içerisine difüze olması sonucunda inklüzyonlar etrafında lamelar kabarcıklanma ve çatlaklar şeklinde form alması nedeniyle, tespiti oldukça kolay ve tehlikesizdir. Ancak HIC çatlakları arasında şekillenen SWC'yi geleneksel ultrasonik yöntemlerle karakterize etmek çok daha zordur. Şekil 5 de SWC çatlağı görünür değilken HIC çatlak görünümü gösterilmektedir. HIC çatlakları yüzeye paralel şekilde lamelar yansıtıcı konumda form alırken, HIC çatlakları arasında oluşan SOHIC/SWC çatlakları yüzeye açılı konumdadır.[4]



Şekil 5. Hidrojen nedenli çatlak (HIC) görünümü (Merdiven adımı çatlağı (SWC) görünür değilken).[4]

Bu amaçla HIC'nı hızlı bir şekilde tespit etmek için normal açılı elektronik elle tarama yapılırken, SOHIC/SWC çatlaklarını tespit etmek için $\pm 30^\circ$ S – tarama yapmak için ikinci bir dosya daha yüklenir. HIC ve SOHIC/SWC çatlakları kalınlığın 1/3 – 2/3 ü arasında meydana geldiğinden tipik olarak ses demetleri orta kalınlığa odaklanmaktadır. Operatör SOHIC çatlaklarını tespit etmek için HIC çatlak sinyalleri arasından gelecek ilave sinyallere bakar. Şekil 6 da SWC çatlakları görünür durumda iken HIC çatlaklarının görünümünü gösterilmektedir.[4]



Şekil 6. Hidrojen nedenli çatlama (HIC) görünümü (Merdiven adımı çatlakları (SWC) görünür durumda).[4]

5. HIC ÇATLAMASINDAN KAÇINMAK İÇİN ÖNLEMLER

HIC veya SWC'ya karşı birincil korozyon kontrol metodu malzeme özelliklerinin kontrol edilmesiyle uygulanır. Kaplama, zırlama ve inhibitör kullanımıyla korozyon kontrolü, bazı operasyonel durumlarda, potansiyel HIC/SWC problemleri için yeterli mühendislik çözümleri olarak tanımlanmıştır.

H₂S içeren ortamlardaki servis şartlarında kullanılması düşünülen çelik ürünlerin HIC/SWC dirençlerini değerlendirmek için HIC test standartlarına uygun olarak test edilmesi gerekmektedir.

Standartlarda verilen kabul kriterlerini sağlamak korozyif servis uygulamalarında HIC/SWC direncini sağlamaktadır. Bununla birlikte bu kriterleri sağlamakta başarısız olan malzemeler orta dereceli korozyif ortamlar için hala uygun olabilir. Böyle durumlarda SWC direnci, gerçek ortam şartlarındaki maruz bırakma testlerinin yürütülmesiyle ve kabul kriterinin hiç çatlama olmayacak şekilde uyarlanması veya geniş ölçekli testlerin gerçekleştirilmesiyle kanıtlanabilmektedir.[6]

Dikişsiz Borular, Dökümler ve Dövme Malzemeler

Dikişsiz boruların HIC/SWC çatlamaına karşı hassasiyeti kaynaklı borudan çok daha azdır. Bununla birlikte dikişsiz borunun saha hasarları SWC hasarı nedeniyle meydana gelmiştir.

Geleneksel olarak sıcak haddelenmiş dikişsiz ürünlerin kükürt bileşimindeki ılımlı bir sınırlama SWC çatlama şiddetini önlemek için gerekli olan önlemleri sağlar. Tipik olarak kükürt limit değeri max. %0.01 olmalıdır. Ayrıca dikişsiz borularda, inklüzyonların segregasyona eğilimli olduğu iç bölgelerde kabarmaya sebep oldukları gözönüne alınmalıdır. Bu durum borunun bütünlüğünü önemli derecede etkilerken, et kalınlığının görüntülenmesini engelleyebilir.

Bu durum döküm malzemeler için özel/spesifik bir gereksinim değildir.

Geleneksel dövme malzemeler için kükürt bileşimi maksimum %0.025 ile sınırlandırılmalıdır.[6]

Haddelenmiş Çelikler

Haddelenmiş çeliklerin kimyasal analiz ve prosesleri üretim esnasında kontrollü olarak sağlandığı takdirde yeterli HIC/SWC direncine sahip şekilde üretilebilmektedirler. Inklüzyonların (özellikle uzamış MnS) varlığı ve segregasyon bantları ve mikroyapıdaki perlit çeliğin HIC/SWC direncini azaltma eğilimindedir. Bu yüzden HIC/SWC direncini iyileştirme işlemleri aşağıdakileri kapsamalıdır;

- Kükürt bileşiminin sınırlandırılması: düşük kükürt bileşimi inklüzyon bileşimini azaltır ve HIC/SWC çatlama direncini artırır.

-İnklüzyonların şeklinin kontrolü: inklüzyonlar kalsiyum işlemi veya nadir toprak elementleri işlemleri kullanılarak küreselleştirilmelidir.

-Segregasyonun minimize edilmesi: karbon ve manganın ağırlıklı olarak merkez hattı segregasyonuna sahip plakalar HIC/SWC çatlamaına karşı oldukça yüksek derecede hassastırlar ve kullanımından kaçınılmalıdır.

-Mekanik özelliklerle ilgili gereksinimleri sağlayacak kadar yetecek şekilde karbon, mangan ve fosforun minimize edilmesi

-Plaka haddelenmenin kontrollü yapılmasıyla perlit bantlarından kaçınmak

H₂S servisi için üretilmiş boru hatları, basınçlı tanklar vs. gibi kritik bileşenler için kullanılan çelik malzemeler standart HIC testi ile test edilmelidir.[6]

6. SONUÇLAR

Ülkemizde ve dünyada doğal gaz ve ham petrol gibi stratejik öneme sahip enerji kaynaklarının iletiminde kullanılan boru hatlarında meydana gelen hasarlar doğaya ve insanlara zarar vermeye birlikte ciddi maddi kayıplara da neden olmakta ve dolayısıyla ülke ekonomisine büyük zararlar vermektedirler.

Petrol ve gaz üretimlerinde H₂S'in varlığı üretim sisteminin bütünlüğüne ve sağlamlığına karşı kendine özgü bir tehdiye neden olur. Çoğu malzemeler H₂S'e maruz kaldıklarında ekipmanın katstrofik kırılmasıyla sonuçlanan çeşitli formlarda çatlamaya maruz kalırlar. Karbon ve düşük alaşımlı çelikler de asidik ortamlarda korozif H₂S içeren ortamlara maruz bırakıldıklarında çatlamaya karşı hassastırlar.[6]

Özellikle sulu H₂S içeren korozif ortamlarda çalışan doğal gaz ve petrol boru hatlarında meydana gelen korozyon hasarlarında ortaya çıkan en yaygın hasarlardan biri HIC hasarıdır. Bu hasarın önlenmesinde en etkili yöntem H₂S içeren ortamlardaki çatlamaya dirençli malzemeleri seçmektir.[3]

Bu düşünceden yola çıkılarak, düşük karbon ve düşük alaşımlı boru hattı çeliklerinde sulu H₂S içeren ortamlarda meydana gelen HIC çatlamasına karşı dirençlerinin belirlenmesi için kullanılan HIC testi standartlarının tanıtılması, malzeme performansının değerlendirilmesinde uygulanan tahribatsız muayene test yöntemleri için hakkında bilgi verilmesi ve bu tip çatlama hasarından kaçınmak için gereken malzeme gereksinimleri hakkında bilgi sağlanarak bu alanda rehber bir döküman sunulması amaçlanmıştır.

KAYNAKÇA

1. M.Graf, F.Grimpe, A.Liessem, R.K.Pöpperling, "Review of the HIC Test Requirements for Linepipe over the years 1975 to 2000", Europipe, Germany, 1999
2. P.Adamiec, J.Dziubinski, "Hydrogen Cracks in Welded Steel Pipes – Part 1: Formation and parameters", Welding Research Abroad, Vol. 49; Part 1, Pages 24-27, 2003
3. Bruno T.V., "Causes and Prevention of Pipeline Failures", Metallurgical Consultant Inc., 1997
4. M. Moles, "Portable Phased Array Applications", 3rd MENDT Conference & Exhibition, Bahrain, Manama, 27-30 Nov. 2005
5. J.Staudt, U.Sauer, "HIC and Steel Cleanliness Inspection", WCNDT, Roma, 2000
6. European Federation of Corrosion Publications, No:16, Guidelines On Materials Requirements For Carbon And Low Alloy Steels For H₂S Containing Environments In Oil And Gas Production, The Institute of Materials, 1995
7. ISO 15156-1, "Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H₂S – containing environments in oil and gas production" Part 1: General principles for selection of cracking – resistant materials, 2001
8. ISO 15156-2, "Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H₂S – containing environments in oil and gas production" Part 1: Cracking resistant carbon and low alloy steels and the use of cast irons, 2003
9. NACE TM 0284-03, Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen Induced Cracking, NACE, 2003
10. www.ic-consult.co.uk