

# AISI 304 ve 316 paslanmaz çeliğinin HCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilerindeki gerilim korozyon çatlama davranışı

Nurşen SAKLAKOĞLU<sup>1</sup>, Simge GENÇALP İRİZALP<sup>\*1</sup>, Zeki Enes GÖKDEMİR<sup>1</sup>,  
Sırrıcan POLAT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Celal Bayar Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Manisa

Makale Gönderme Tarihi: 24.02.2016

Makale Kabul Tarihi: 17.03.2016

## Öz

*Saldırgan ortamlarda çalışan metalik malzemelerin birçoğu mekanik gerilmelere maruz kalabilmektedir. Özellikle üretim proseslerinden dolayı deformasyon sertleşmesi indüklenmiş düşük karbonlu paslanmaz çelikler farklı korozif ortamlarda gerilme korozyonu çatlama davranışı açısından önemli sonuçlar doğurabilmektedir. Böyle ortamlarda gerilmeli korozyon çatlama teşvik eden çevresel faktörler ve mekanizmaları anlamak büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma AISI 304 ve 316 paslanmaz çelik malzemelerinin hassaslaştırma ısı işlemi öncesi ve sonrasında U-büküm numune kullanılarak agresif ortamlardaki gerilmeli korozyon çatlama davranışını anlamayı hedeflemektedir. Hassaslaştırma işleminin uygulanmasıyla yanlış ısı işlem uygulamaları veya kaynaklı bağlantılar ya da işletme koşullarında ısıya maruz kalmış bölgeler temsil edilerek değerlendirilebilmiştir. Gerilmeli korozyon çatlama (GKÇ) davranışı U-bükülmüş malzemelere ortam sıcaklığında %10 HCl çözeltisinde ve %10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde belirlenmiştir. Sonuçlar paslanmaz çeliğin GKÇ davranışının temelde ısı işlemle hassaslaştırılmış çeliğinkinden farklı olduğunu işaret etmektedir. Korozyon davranışı ağırlık kaybı ve metalografik incelemeler ile tespit edilmiştir. Çalışmalar, hassaslaştırma işlemi ile malzemelerin korozyona duyarlı hale gelerek özellikle AISI 304 malzemesinde agresif ortamın değişkenliğine göre hem GKÇ oluştuğunu hem de taneler arası korozyona yatkın hale gelebildiğini gösterirken, AISI 316 malzemesinde ise korozyon davranışı gözlemlenmediğini göstermiştir. AISI 304 paslanmaz çelik malzemesinde HCl ortamında GKÇ mekanizmasının kayma çizgileri boyunca etkin olduğu gözlemlenmiştir. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamında ise korozyonun belirgin şekilde tanelerarası modda oluştuğu belirlenmiştir. AISI 316 paslanmaz çelik malzemesinin her iki ortamda da mükemmel korozyon direnci gösterdiği görülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** Gerilmeli korozyon çatlama; Tanelerarası korozyon; Östenitik paslanmaz çelik

## Giriş

Östenitik paslanmaz çelikler nükleer santral, güç santralleri gibi yüksek güvenlik gerektiren alanlarda basınçlı kaplar, buhar kazanları, boru ve bağlantı elemanlarında kullanılmaktadır (Xu vd., 2013).

Ayrıca çukurcuk ve aralık korozyona olan direnci sebebiyle bot pervaneleri, pompa komponentleri, valfler, şaft komponentleri, hidrolik kontrol sistemleri, offshore petrol platformlarındaki kimyasal enjeksiyon boruları vb denizel uygulamalarda tercih edilirler (Modeli, 2009; Almubarak vd., 2013).

Saldırgan ortamlarda çalışan metalik malzemelerin çoğu mekanik gerilimlere maruz kalır. Bu mekanik gerilimler malzemenin çalıştığı ortamdan gelebileceği gibi, malzemelerin kaynak, talaşlı imalat, plastik deformasyon gibi imalat metotlarından kaynaklanan kalıntı gerilimler de olabilmektedir. Bu tür ortamlarda çalışan elemanların ömrünün belirlenmesinde en önemli etkenlerden birisi gerilme, korozif ortam ve korozyona duyarlı malzeme faktörlerinin bir araya gelmesiyle malzemenin hasara uğramasıdır. Gerilim korozyon çatlaması (GKÇ) olarak adlandırılan bu hasara malzeme hassasiyetinin tetiklediği tanelerarası korozyon da eşlik eder (Modeli, 2009).

GKÇ mekanizması etkileşim içindeki çeşitli malzeme, çevre ve mekanik parametrelerin ortak bir sonucu olarak gelişebilmektedir ve bu olası farklı parametre kombinasyonları için tanımlanması oldukça zordur (Modeli, 2009). Bu çalışmada HCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamında U-bükümle indüklenen düşük gerilmeler altında AISI 304 ve 316 tip paslanmaz çeliklerin GKÇ davranışı incelenmiştir. Sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) dünyada en çok üretilen asittir. Doğrudan ya da dolaylı olarak hemen hemen bütün endüstrilerde kullanılmaktadır. Başlıca kullanım alanları çeliklerin ve metallerin temizlenmesi, gübre, boya, ilaç, pigment sanayi, patlayıcılar, sentetik deterjanlar, tekstil, suni ipek, petrol rafinasyonu ve kauçuk üretimi olarak sayılabilir. Hidroklorik

Asit (HCl) (Tuz Ruhı) kullanan sektörlerden bazıları şunlardır; reçine rejenerasyonu, çelik dekapaj, petrol, temizlik sektöründe, atık su arıtmalarında, deterjan sanayinde, kimya, boya, ilaç, ahşap imalat sanayinde, kağıt, tekstil endüstrisi, metal klorürleri üretimi olarak sayılabilir. Hidroklorik asit ayrıca pil, flaş ampuller, havai fişek, şeker işleme, galvaniz ve metal temizleme de kullanılır. Her iki paslanmaz çelik de ısıtma işlemi tabii tutularak korozyona hassas hale getirilmiştir. Genellikle hassaslaştırma işlemi GKÇ davranışını önemli ölçüde etki etmektedir (Garcia vd., 2001). Böylece yanlış ısıtma uygulamaları, kaynaklı birleştirmeler ya da işletme koşullarında ısıya maruz kalma durumları da değerlendirilebilmiştir.

## Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada AISI 304 ve 316 kalite paslanmaz çeliğin gerilim korozyon çatlaması araştırılmış, U-bükülerek malzemede gerilmeler oluşturulmuştur.

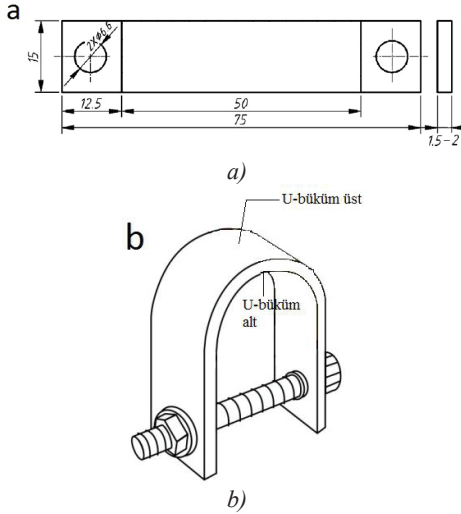
U büküm numune ile oluşan gerinim aşağıda hesaplanmıştır, burada t numune kalınlığı, R U-büküm yarıçapı ve  $\epsilon$  gerinimdir (Covino vd., 2013) :

$$\epsilon = t / 2R \quad (t < R \text{ iken}) \quad (1)$$

Eşitlik (1) kullanılarak AISI 304 paslanmaz çelik için, t= 2 mm ve R=13 mm olduğundan, gerinim değeri yaklaşık 0.076 olarak elde edilmiştir ve AISI 316 paslanmaz çelik için, t= 1.5 mm ve R=13 mm olduğundan gerinim değeri yaklaşık 0.057 olarak elde edilmiştir.

U-büküm parçaların korozyona uğrama süreleri boyunca sabit bir gerilme altında kalabilmeleri için parça üzerindeki deliklere civata-somun takılıp sıkılmıştır. Somun ve civatanın paslanmaz çelikte temasını engellemek için plastik conta kullanılmıştır. Numunelerin büküm öncesi ve sonrası şematik gösterimleri Şekil 1' de verilmiştir. Bazı krom nikelli östenitik paslanmaz çelikler 450°C ila 850°C arasında bir sıcaklığa kadar ısıtılıp o sıcaklıkta tutulduklarına krom karbür çökmesi eğilimi

kendini gösterir. Bunun sonucunda tane sınırlarında kromca zayıflama meydana gelir ve malzeme korozif bir ortamda bulunduğu zaman, kromca zayıflamış olan tane sınırlarında korozyon meydana gelir. Isıl işleme uygulanması, kaynaklı birleştirmeler ya da yüksek sıcaklıklarda çalışmalar sırasında ortaya çıkabilecek bu duruma “hassaslaştırma” denmektedir. Bu çalışmada malzemenin hassaslaşmış durumdaki korozyon davranışını incelemek amacıyla 600°C’ de 4 saat tutulup yavaş soğutulmuş malzeme ile hassaslaştırılmamış malzeme karşılaştırılmıştır.

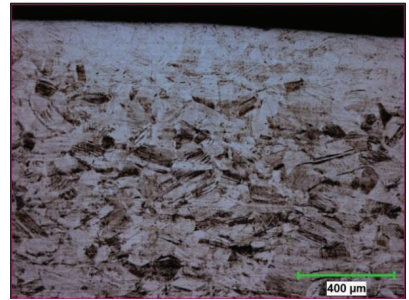
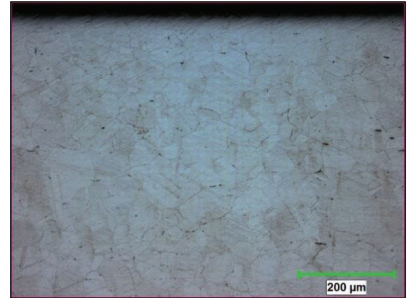


Şekil 1. (a) U-büküm öncesi numune boyutları  
(b) U-büküm numune

Her numune ayrı beherlerde 2 tip korozif sıvıda bekletilerek korozyon davranışı incelenmiştir. Çözeltiler 48 saatte bir yenilenmiş ve süre sonunda parçalar çözeltiden çıkarılıp somun, civata ve contalar sökülerek parçalardaki ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Tablo 1’ de test edilen paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri verilmiştir. Bu çalışmada korozyon ortamı olarak % 10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve % 10 HCl olmak üzere iki farklı ortam kullanılmıştır.

## Sonuçlar ve Tartışma

Gerilmeli korozyon çatlakları için U-büküm proseslerinde induklenen plastik deformasyon malzemede önemli mikroyapısal değişimlere yol açmaktadır. Şekil 2’de AISI 304 malzemesinin U-büküm işlemiyle malzemede meydana gelen kayma (deformasyon) çizgileri açıkça görülmektedir. Şekil 3’ de farklı korozyon çözeltilerinde bekletilmiş AISI 304 paslanmaz çelik malzemesinin dağlanmamış mikroyapı görüntüleri verilmiştir. HCl çözeltilisinde bekletilen AISI 304 paslanmaz çelikte 168 saate kadar herhangi bir korozyon görülmemiştir. 168. saatte ise hassaslaştırılmamış malzemede korozyon görülmemiş ancak hassaslaştırılmış malzemede kayma bantları boyunca korozyonun ilerlediği ve ayrıca gerilim korozyon çatlama meydana geldiği görülmüştür (Şekil 3).



Şekil 2. AISI 304 malzemesine ait dağlanmamış mikroyapı görüntüleri: (a) U-büküm öncesi (b) U-büküm sonrası (üst-bölge) mikroyapı değişimi (dağlanmamış)

GKÇ tipik olarak çatlak başlangıcı ve ilerleme fazı olarak iki kısımda incelenir. Bölgesel korozyon ya da mekanik kusur bölgelerinde

başlayan mikroskobik çatlak GKÇ için çatlak başlangıcını oluşturur (Andresen vd., 2005).

**Tablo 1.** Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu

ASTM	EN	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %
316	1.4401	0,08	2,0	1,0	0,045	0,03	16-18	10,0-14,0	2,0-3,0
304	1.4301	0,08	2,0	1,00	0,045	0,03	18-20	8,0-10,5	

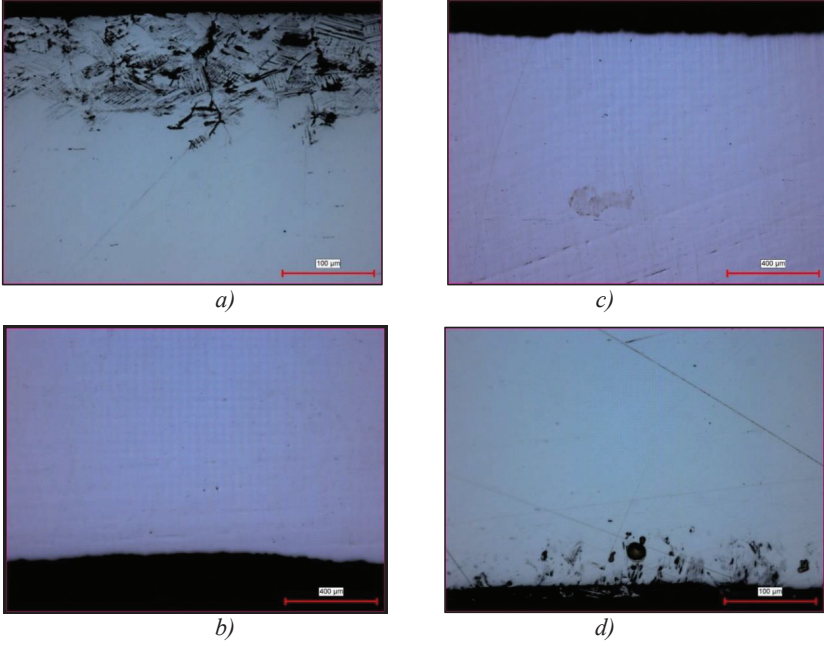
%10 HCl çözeltisinde 168 saat sonunda gözlemlenen dağlanmamış mikroyapı görüntülerinden (Şekil 3) açıkça görüldüğü gibi soğuk deforme edilmiş östenitik paslanmaz çelikte hem çatlak başlaması hem de ilerlemesinde kayma çizgilerinin baskın bir rol oynadığı gözlemlenmektedir. Şekil 4, saldırının, ortamın etkisi ile korozyonun pit oluşumu ve kayma çizgileri boyunca ilerlemesi yoluyla nasıl meydana geldiğini ve sonra çatlak oluşumuna teslim olduğunu göstermektedir. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde ise hassaslaştırılmamış AISI 304 paslanmaz çelik malzemesinde 144 saate kadar korozyon meydana gelmemiştir. Hassaslaştırılmış malzemede ise 96 saatte korozyon etkili hale gelmiştir. Korozyon belirgin bir şekilde tanelerarası modda meydana gelirken, deformasyon izleri olan kayma bantlarında da korozyon oluştuğu gözlemlenmektedir (Şekil 5). Isselin vd. (2008) düşük karbonlu paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklıktaki sulu ortamda soğuk deformasyonun GKÇ davranışına olan etkilerini küçük panç (small punch) testi ile ortaya koymuşlardır.

Malzemede gelişen çatlak başlangıcı esnasında sadece birkaç mikroçatlak bulunduğunu ve mikroçatlakların inklüzyon kümesinde veya kayma çizgileri alanı üzerinde yer aldığını gözlemlenmişlerdir. 120. saatte korozyonun arttığı ve tanelerarası modda geliştiği ve tane sınırlarında krom karbür bulunan bölgelerde özellikle ilerlediği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde 144. saatte (Şekil 5) korozyon daha da artış göstermiş ve yüzeyden malzeme kaybı büyük miktara ulaşmıştır. Bu şekilde yüzeyde genel korozyon da oluşabilmektedir ve bu durum literatürde önceki gözlemlerle paraleldir ve ortamın son derece agresif yapısına dayandırılmaktadır (Kain ve De, 2003; Torchio, 1980).

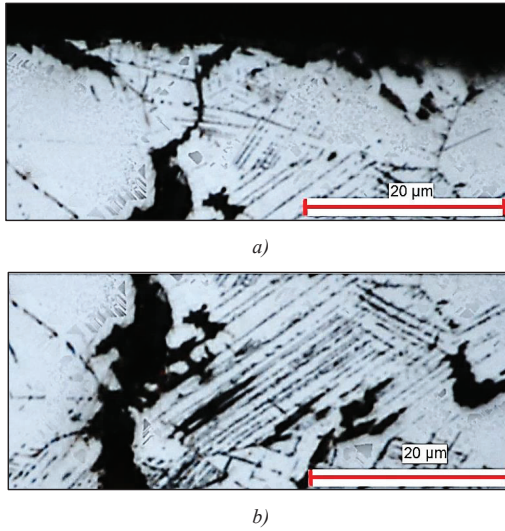
Azhani vd. (2014) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve NaCl konsantrasyonlarında AISI 304 paslanmaz çeliğin GKÇ davranışını araştırdıkları çalışmalarında H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ün yüksek miktarda malzeme kaybına yol açtığını bunun tane sınırlarında sülfür konsantrasyonunun artışıyla tanelerarası korozyonun artmasından kaynaklandığı gözlemlenmişlerdir.

Bu çalışmada, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde malzemelerde gerilim korozyon çatlak oluşmadığı gözlemlenmiştir. AISI 316 paslanmaz çelik için aynı şartlarda yapılan testler 336. saate kadar gerçekleştirilmiş hem H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hem de HCl çözeltilerinde metalografik incelemelerde hiçbir korozyon olayına rastlanılmamıştır (Şekil 6).

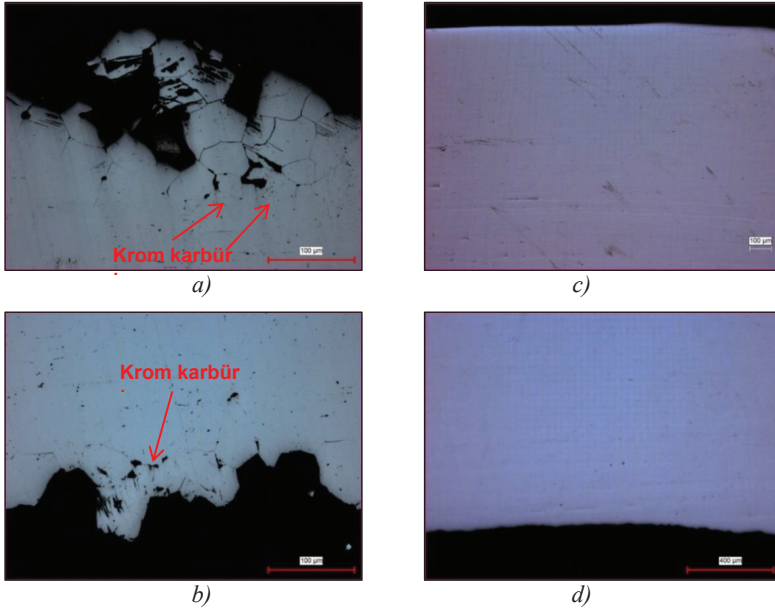
AISI 304 ve 316 paslanmaz çeliğinin HCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilerindeki gerilim korozyon çatlama davranışı



Şekil 3. AISI 304 paslanmaz çelikte HCl ortamında 168. saatte kesit mikroyapısı (dağlanmamış):  
(a) Hassaslaştırılmış U-büküm üst bölgesi, (b) Hassaslaştırılmış U-büküm alt bölgesi,  
(c) Hassaslaştırılmamış U-büküm üst bölgesi, (d) Hassaslaştırılmamış U-büküm alt bölgesi

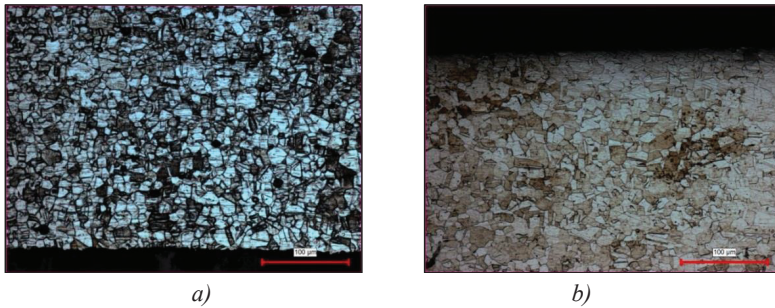


Şekil 4. AISI 304 paslanmaz çelikte HCl ortamında kayma bantları ve pitler arasındaki etkileşimden dolayı çatlak başlangıcını gösteren mikroyapı (dağlanmamış)



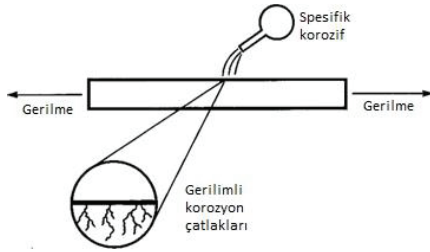
Şekil 5. AISI 304 paslanmaz çelikte  $H_2SO_4$  ortamında 144. saatte kesit mikroyapısı (dağlanmamış):  
(a) Hassaslaştırılmış U-büküm üst bölgesi, (b) Hassaslaştırılmış U-büküm alt bölgesi, (c)  
Hassaslaştırılmamış U-büküm üst bölgesi, (d) Hassaslaştırılmamış U-büküm alt bölgesi

Gerilim korozyon çatlama (GKÇ) çekme gerilmesi altında korozyonun etkisiyle malzemede çatlak oluşumdur ve bu çatlaklar dallanarak ilerler. Gerilim korozyon çatlak oluşumu şematik olarak Şekil 7’de görülmektedir. GKÇ’nin meydana gelmesi için çevresel gerilmelerin eşik değeri aşması, alaşımı korozyona karşı daha hassas yapacak metalürjik değişkenlerin varlığı (ısıtım işlemi, yapı, soğuk işlem vb.) ve sıcaklık, çözelti konsantrasyonu gibi diğer değişkenler gereklidir. Artık gerilmeler ya da çalışma sırasında oluşan düşük değerlerdeki gerilmeler bu noktalarda koruyucu özelliği olan oksit tabakasının zayıflamasına ve kırılmasına yol açarak metal yüzeyinin korozyona maruz kalması ile çatlak oluşumu başlatmaktadır (Modeli, 2009). Çatlak ucundaki pasif filmin uygulanan gerilme ile kırılması sonucu çeliğin korumasız hale gelmesinin bir sonucu olduğu söylenebilir (Seguin, 2013).

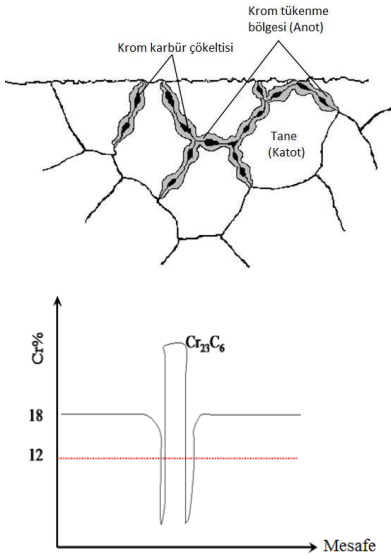


Şekil 6. Hassaslaştırılmış AISI 316 paslanmaz çelikte 336. saatte yüzey mikroyapısı (dağlanmış)  
(a)  $H_2SO_4$  ortamı, (b) HCl ortamı

Isıl işlemin etkisi ile tane sınırlarında krom karbür çökeltisi oluşması nedeniyle bazı bölgelerin Cr-ca zayıfladığı, koruyucu oksit tabakanın ortadan kalktığı ve bu bölgelerde korozyon meydana geldiği görülmektedir. Singh (Singh, 2008) soğuk deformasyonla üretilmiş ve hassaslaştırılmış AISI 304 malzemesinin tanelerarası GKÇ davranışını yavaş gerinme hızı testi ile araştırmışlardır. Deformasyondaki artışla, karbür çökeltilerinin tane matrisinde giderek yaygın hale geldiğini belirtmişlerdir.



Şekil 7. GKÇ oluşum mekanizması (Ahluwalia, 2010)



Şekil 8. Isıl işlemin tanelerarası korozyona etkisi (Almubarak vd., 2013)

Krom karbür ile etrafındaki bölge arasında potansiyel farklılık oluşmakta ve galvanik korozyon oluşmaktadır (Şekil 8). Şekil 5' de hassaslaştırılmış ve 144 saat  $H_2SO_4$  çözeltisinde bekletilmiş numunenin yüzey görüntüsü üzerinde krom karbürün tercihli olarak çözünmesi görülmektedir.

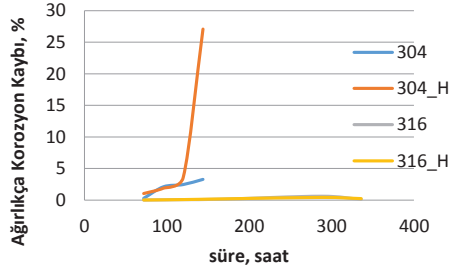
Bu çalışmada korozif çevre olarak HCl çözeltisi seçildiğinde hassaslaştırılmış AISI 304 paslanmaz çelikteki çatlakların numune kalınlığının yaklaşık 1/20 derinliğinde durması U-büküm numunenin kesiti boyunca gerilim dağılımı açısından açıklanabilir. U-bükülmüş malzemelerin U-büküm-üst bölgesinde çekme gerilmelerinin oluşması nedeniyle GKÇ meydana gelmiştir. U-bükülmüş malzemenin alt kısmında basma tipi gerilmeler meydana geldiğinden ve bu tip gerilmeler korozyon, yorulma gibi olaylarda yararlı etki sağladığından bu bölgelerde GKÇ oluşmadığı gibi genel korozyon oluşumu da daha az meydana gelmiştir. Ghosh ve Kain (2010) kesitten incelemelerde çatlama davranışını tavllanmış, işlenmiş ve soğuk deforme edilmiş AISI 304L malzemesi ile incelemişlerdir ve numune kesitini mevcut gerilim dağılımına göre üç bölgeye ayırmışlardır: (i) U-bükümün üst bölümü çekme bölgesi, (ii) U-bükümün alt bölümü basma bölgesi ve (iii) çekme basma gerilmelerinin birbirini etkisiz bıraktığı nötr bölge. Bu malzemenin doğası gereği çatlak ilerlemesinin tanelerarası olduğunu ve bunun çekme gerilmesi altındaki yüzeyden başlayarak kalınlık boyunca basma gerilmesi altındaki iç bölgeye doğru hareket ettiğini gözlemlemişlerdir. Çekme gerilmelerinin büyüklüğünün GKÇ için çatlak başlangıcını etkilediği bilinmektedir. GKÇ'nin önlenmesi için çekme gerilmelerinin mümkün olduğunca düşük tutulması gerekir (Parrot ve Pitts, 2011). Kayma düzlemi üzerinde bulunan mobil dislokasyonlar üzerinde klorürün kimyasal adsorpsiyonu yoluyla zaten U-büküm 304 paslanmaz çelik malzemesinin üst bölgesinde belli bir gerinime sahip atom bağlarının zayıflaması ile yüzey enerjisinin düşmesinin bir sonucu olarak keskin bir süreksizlik oluşmakta ve bu durum çatlığın başlaması ile

sonuçlanmaktadır (Ghosh ve Kain, 2010). Şekil 6 sadece bu açıklanan yüzey fenomeninin kanıtı değildir, aynı zamanda pit oluşumunun iç yüzeyinden kayma çizgileri boyunca çatlakların başladığının da bir kanıtıdır. Çünkü pit içerisinde ortamın saldırganlığı yüzeyden daha şiddetlidir. Bu durumu Ghosh ve Kain bir pit içerisindeki kimyasal reaksiyonların otokatalitik doğasına mal etmektedirler (düşük pH ve yüksek klorür içeriği) (Ghosh ve Kain, 2010). Fujita (1958) malzeme içerisinde daha önceden var olan kayma bantlarının uygulanan gerilme ile aktive edilmesiyle, o kayma bandında yer alan dislokasyonların bir tünel içine zorlandığını ve orada kilittendiğini ileri sürmüşlerdir. Tünelde gerilim konsantrasyonu gelişir ve o tünel çevresindeki malzemenin yırtılmasına sebep olur. Agresif ortamın varlığı kimyasal çözünmenin hızını artırıcı koşulları şiddetlendirmektedir ve böylece tünel boyunca korozyonun yayılması şiddetlenmektedir (Ghosh ve Kain, 2010).

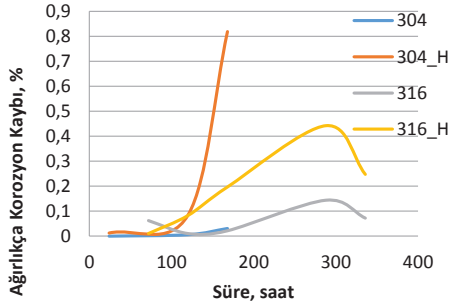
AISI 304 ve 316 paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonlarına bakıldığında 316 paslanmaz çeliğin Ni içeriğinin daha fazla olduğu ve ayrıca Mo içerdiği görülmektedir. %50 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + %3 NaCl içerisinde U-bükülmüş numunelerle yapılan çalışmalarda alaşımın Ni içeriğindeki artışın GKÇ oluşumuna direnç gelişmesine katkı sağladığı görülmüştür (Forest, 1983). Ayrıca INCO (The International Nickel Company Inc) 'nun yayınladığı rapora göre %20' den az ve %80' den fazla H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> konsantrasyonlarında oda sıcaklığında 316 paslanmaz çeliğin korozyona dayanımı yüksektir (INCO) . İlâveten, Kannan vd. minör alaşım elementi olarak Mo içeren paslanmaz çeliklerin H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gibi oksitleyici olmayan ortamlarda kendiliğinden pasivasyon sağladığını belirtmektedir (Kannan vd., 2004). Tüm bu sonuçlar bu çalışmada elde edilen sonuçlarla uyumludur. Bu çalışmada AISI 316 paslanmaz çelik mükemmel korozyon direnci göstermiştir.

Şekil 9 ve 10' da ağırlıkça korozyon kaybı grafikleri verilmiştir. Görüldüğü gibi, AISI 304 paslanmaz çelik için H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamında oldukça önemli malzeme kaybı meydana gelmiştir

(Şekil 9). Bu kayıp hassaslaştırılmamış malzemede %3 mertebesindeyken, hassaslaştırılmış malzemede %27' yi aşmıştır.



Şekil 9. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamında ağırlıkça korozyon kaybı



Şekil 10. HCl ortamında ağırlıkça korozyon kaybı

%10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> konsantrasyonunda GKÇ'den ziyade tanelerarası ve genel korozyon modunda korozyon meydana gelmiş olup, tane sınırlarının tamamen korozyona uğrayarak malzemeden ayrılmasıyla önemli miktarda malzeme kaybına yol açmıştır. Bu durum çekme gerilmeleri kadar ortamın etkisini de ortaya koymaktadır. HCl ortamında ise hassaslaştırılmış malzemede bile korozyon kaybı %1' e ulaşmamıştır (Şekil 10). AISI 316 paslanmaz çelik için her iki ortamda da %0,1'in altında korozyon kaybı meydana gelmiştir. AISI 316 malzemesinde 288 saatten sonra korozyon kaybında azalma meydana gelmesi, pasivasyon tabakasının yeniden oluşmaya başladığını düşündürmektedir. %10 HCl konsantrasyonu



nunda hassaslaştırılmış AISI 304 paslanmaz çelikte çekme gerilmesinin en yüksek olduğu bölgelerde (U-büküm-üst bölge) ağırlıkça korozyon kaybı önemli miktarlara ulaşmazken, birçok noktadan GKÇ 'nin başladığı, bu çatlak boyutunun 300 mikrometreyi aştığı ve dallanarak ilerleme modunda olduğu belirlenmiştir (Şekil 3). Malzeme kaybı miktarca az olsa da, bu tip çatlakların malzemenin dayanımını önemli ölçüde düşüreceği açıktır.

## **Sonuç**

Bu çalışmada AISI 304 ve 316 paslanmaz çeliklerin %10 HCl ve %10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamında gerilim korozyon çatlama davranışı araştırılmıştır. Buna göre;

1) %10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamında oda sıcaklığında korozyonun tespiti hem metalografik inceleme ile hem de ağırlık kaybı ile ortaya konmuştur. AISI 316 paslanmaz çelik malzemesinde 336.saatte bile neredeyse hiç ağırlık kaybı meydana gelmemiştir. AISI 304 malzemesinde ise hassaslaştırma işlemi ile malzemenin korozyon davranışının değiştiği ortadadır. Hassaslaştırılmış malzemede ağırlık kaybı 144. saatte yaklaşık %27 iken, hassaslaştırılmamış malzemede yaklaşık %3,2' dir. Bununla birlikte H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamında her iki malzemede de GKÇ meydana gelmemiştir.

2) %10 HCl ortamında ortam sıcaklığında korozyonun tespiti hem metalografik inceleme ile hem de ağırlık kaybı ile ortaya konmuştur. Ağırlık kaybı sonuçları tüm malzemeler için %1' in altındadır. %10 HCl ortamı bu malzemeler için önemli bir ağırlık kaybı oluşturmamaktadır. Bununla birlikte, birçok noktadan GKÇ 'nin başladığı, bu çatlak boyutunun 300 mikronu aştığı ve dallanarak ilerleme modunda olduğu belirlenmiştir. Malzeme kaybı miktarca az olsa da, bu tip çatlakların malzemenin dayanımını önemli ölçüde düşüreceği açıktır. Çekme gerilmelerinin büyüklüğünün GKÇ için çatlak başlangıcını etkilediği bilinmektedir. GKÇ'nin önlenmesi için çekme gerilmelerinin mümkün olduğunca düşük tutulması gerekir.

3) Oda sıcaklığında AISI 304 paslanmaz çelik malzemesinde GKÇ mekanizması üzerinde soğuk deformasyon esnasında oluşan kayma çizgileri boyunca korozyon saldırısının etkin olduğu ve aynı koşullarda AISI 316 paslanmaz çelik malzemesinde korozyon olayına rastlanmaması bu çalışmadaki anahtar gözlemdir. AISI 316 paslanmaz çelik malzemesinin her iki ortamda mükemmel korozyon direnci gösterdiği ve yüzeylerinde GKÇ, tanelerarası korozyon veya genel korozyon tipinde hiçbir korozyon reaksiyonunun gelişmediği görülmüştür. Bu sonuç da malzeme seçiminin pek çok durumda GKÇ'yi önlemek için alınabilecek en etkili yöntem olduğunu kanıtlamaktadır.

## **Kaynaklar**

- Ahluwalia, H., "Stress Corrosion Cracking", (2010). <http://csidesigns.com/flowgeeks/stress-corrosion-cracking>.
- Almubarak, A., Abuhaimeed, W., Almazrouee, A., (2013). "Corrosion behavior of the stressed sensitized austenitic stainless steels of high nitrogen content in seawater", *International Journal of Electrochemistry*, 2013, 1-7.
- Andresen, P.L., Gordon, G.M., Lu, S.C., (2005). "The stress-corrosion-cracking model for high-level radioactive-waste packages", *JOM*, 57, 1, 27-30.
- Azhani, N., Razak, A., Asmara, Y.P., Mohamad Khairuazlan, K., (2014). "Influences of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaCl concentrations on stress corrosion cracking of AISI 304 stainless steel", *Advanced Materials Research*, 893, 410-414.
- Covino, J., Bernard, Jr, S., Covino, B.S., Cramer, S. D., (2013). "ASM Handbook: Corrosion: fundamentals, testing, and protection", 13, ed. Cramer, S.D., Bernard S.C., ASM international.
- Forest, I.S., (1983). "The corrosion resistance of nickel-containing alloys in sulfuric acid and related compounds", INCO The International Nickel Company.
- Fujita, F.E., (1958). "Dislocation theory of fracture of crystals", *Acta Metallurgica*, 6, 8, 543-551.
- García, C., Martín, F., De Tiedra, P., Heredero, J. A., Aparicio, M. L., (2001). "Effects of prior cold work and sensitization heat treatment on chloride stress corrosion cracking in type 304 stainless steels", *Corrosion Science*, 43, 8, 1519-1539.

- Ghosh, S., Kain, V., (2010). "Effect of surface machining and cold working on the ambient temperature chloride stress corrosion cracking susceptibility of AISI 304L stainless steel", *Materials Science and Engineering: A*, 527, 3, 679-683.
- INCO The International Nickel Company, "Corrosion resistance of the austenitic chromium-nickel stainless steels in chemical environments", [https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/CorrosionResistanceoftheAusteniticChromiumNickelStainlessSteelsinChemicalEnvironments\\_2828\\_ashx](https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/CorrosionResistanceoftheAusteniticChromiumNickelStainlessSteelsinChemicalEnvironments_2828_ashx)
- Isselin, J., Kai, A., Sakaguchi, K., Shoji, T., (2008). "Assessment of the effects of cold work on crack initiation in a light water environment using the small-punch test", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39, 5, 1099-1108.
- Kain, V., De, P.K., (2003). "Transformation of delta ferrite during high heat input welding of austenitic stainless steels", *Materials Performance*, 42, 2, 50-54.
- Kannan, S., Balamurugan, A., Rajeswari, S., (2004). "H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as a passivating medium on the localised corrosion resistance of surgical 316L SS metallic implant and its effect on hydroxyapatite coatings", *Electrochimica Acta*, 49(15), 2395-2403.
- Modeli, F.R.I., (2009). "Nükleer santrallerde gerilim korozyon çatlama problemi", X. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, Muğla.
- Parrott, R., Pitts, H., (2011). "Chloride stress corrosion cracking in austenitic stainless steel", Research Report, RR902, Health and Safety Executive, Derbyshire.
- Seguin, D.J. (2013). "Intergranular corrosion and stress corrosion cracking of extruded AA6005A", Doktora tezi, Michigan Technological University.
- Singh, R., (2008). "Influence of cold rolling on sensitization and intergranular stress corrosion cracking of AISI 304 aged at 500°C", *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 1, 286-293.
- Torchio, S., (1980). "Stress corrosion cracking of type AISI 304 stainless steel at room temperature; influence of chloride content and acidity", *Corrosion Science*, 20, 4, 555-561.
- Xu, J., Wu, X., Han, E., (2013). "Acoustic emission response of sensitized 304 stainless steel during intergranular corrosion and stress corrosion cracking", *Corrosion Science*, 73, 262-273.

## Stress corrosion cracking behavior of AISI 304 and 316 stainless steel in HCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions

### Extended abstract

*Stainless steel resists corrosion, maintains its strength in high temperatures, and so it is widely used in industries including automotive, health, food and chemical industries. Stainless steels are used in countless diverse applications for their corrosion resistance. However, work hardening has an effect on austenitic stainless steel resistance to stress corrosion cracking. Stress corrosion cracking is one of the most severe maintenance problems in power generation, nuclear and chemical industry. The stress corrosion cracking investigations has recently attracted the attentions of researchers.*

*Stress corrosion cracking takes place in some main factors: a susceptible material, corrosive environment and mechanical stress problems. Many metallic parts operated in aggressive environments can be exposed to mechanical stresses. Especially, work-hardened low-carbon stainless steel induced by manufacturing processes has important consequences concerning stress corrosion cracking in different corrosive environments. It is of great importance to understand the environmental factors and mechanisms promoting the stress corrosion cracking in such environments.*

*In this study, stress corrosion cracking behavior of AISI 304 stainless steel and AISI 316 stainless steel was investigated and stresses were induced into the materials by U-bending. This study aims to understand the stress corrosion cracking behavior of sensitized or non-sensitized AISI 304 and 316 austenitic stainless steel by using U-bend specimen in aggressive environments. Incorrect heat treatments, welded joints, or the metallic parts exposed to heat in operating conditions were estimated by the sensitization treatment. Stress corrosion cracking (SCC) behavior was determined in 10% HCl and 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution at room temperature.*

*The results indicate that stress corrosion cracking behavior of stainless steel is essentially different from the sensitized stainless steel. Corrosion behavior was determined by weight loss and metallographic examinations. The study reveals that materials becomes more susceptible to corrosion by sensitizing. Especially in AISI 304 stainless steel, both SCC and transgranular corrosion can occur according to variable aggressive environments. On the other hand, it was observed that AISI 316 did not show corrosion behavior in both aggressive environments. It was observed that the stress corrosion cracking mechanism in HCl solution of AISI 304 stainless steel accompanied by shear bands. It was determined that the corrosion becomes prominently in intergranular mode in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. It was seen that AISI 316 stainless steel has excellent corrosion resistance in both aggressive environments.*

**Keywords:** Stress corrosion cracking, transgranular corrosion, austenitic stainless steel

# mühendislik dergisi

