

Dubleks Paslanmaz Çeliklerde Sigma Fazının Korozyon Dayanımına Etkileri

Aziz Barış BAŞYİĞİT ve Adem KURT

MKEK Mühimmat Fabrikası, Sanayi ve Teknoloji Müdürlüğü
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Telefon:+90 533 612 0521 abbasyigit@gazi.edu.tr, ademkurt@gazi.edu.tr

Abstract— Duplex stainless steels consist of approximately half austenitic and half δ -ferritic phases and are preferred due to applications demanding both satisfactory corrosion and strength properties versus solely ferritic and austenitic grades. In this work; deleterious sigma phase that may form in microstructures of S32205 (2205) duplex stainless steel plates was intended to be quantified after various thermal conditions such as heat treatments, welding and service life and also the effects of sigma phase on microstructural and corrosion properties were investigated. Sigma phase was formed in two distinct raw material by applying heat treatments, and microstructural and corrosion states were analyzed. For this purpose; 800°C was adjusted as heat treatment temperature and two separate specimens were heated through 5,5 and 16 hours of duration time in consequence of the most rapidly formation rate of sigma phase at this temperature.

Index Terms—Duplex Stainless Steels, Sigma Phase, Corrosion in Stainless Steels.

Özet— Dupleks paslanmaz çelikler; delta-ferrit ve östenit fazlarının yaklaşık olarak yarı-yarıya bir arada bulunduğu ve ferritik ile östenitik türlere göre yeterli korozyon dayanımı ve mukavemet özelliklerinin bir arada istendiği uygulamalarda tercih edilmektedir.

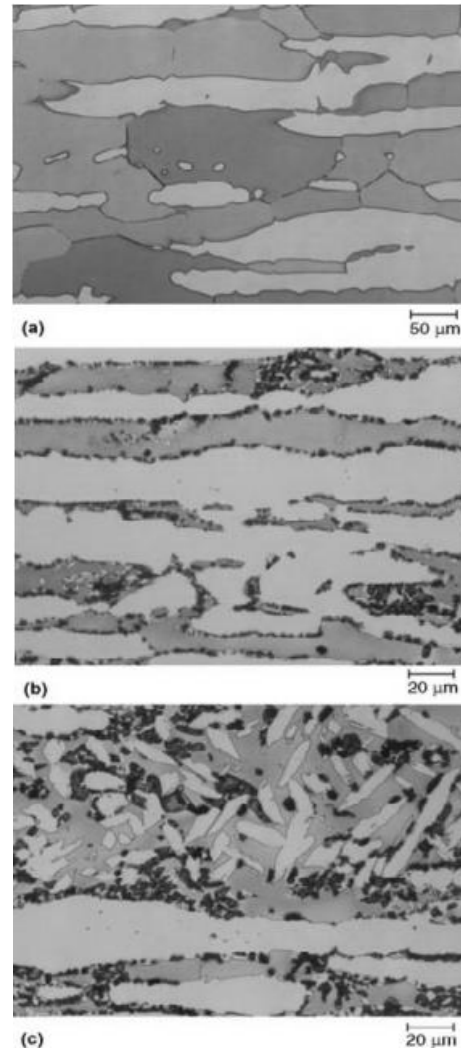
Bu çalışmada; dupleks paslanmaz çeliklerde ısı işlem ve kaynak uygulaması veya kullanım ömrü süresince değişen termal koşullara göre mikro yapıda oluşabilecek zararlı fazlardan olan sigma fazının tespit edilmesi ve korozyon davranışlarına etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Sigma fazı iki ayrı ana malzemede ısı işlem ile oluşturulmuş, mikro yapısal ve korozyon davranış durumları incelenmiştir. Bu amaçla; sigma fazının en hızlı olduğu 800°C sıcaklığı ısı işlem amacıyla seçilmiş ve iki ayrı numuneye 5,5 saat ve 16 saat sürelerle ısı işlem uygulanmıştır. Bu sıcaklıkta bekleme süresinin sigma fazının miktarına ve korozyon dayanımına etkileri de araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler— Dupleks Paslanmaz Çelik, Sigma Fazı, Paslanmaz Çeliklerde Korozyon.

I. GİRİŞ

Dupleks paslanmaz çelikler; üstün korozyon dirençleri, mukavemetleri veya her iki avantajlarından

faydalanılan uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Ayrıca çoğu korozyon uygulamalarda yapı çeliklerine göre üstündürler ve kıyaslanabilir mukavemete sahiptirler. Dupleks paslanmaz çelikler hem sahilde hem de kıydan uzakta petrol ve gaz boru hatlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [1,2].



Şekil 1. 2205 dupleks paslanmaz çelikte sigma fazı oluşumu, %20NaOH [3]

Dupleks paslanmaz çelikler, düşük sıcaklıklarda bazı kırılma mekanizmaları çöktürücü oluşturduklarından dolayı yaklaşık

olarak 280°C sıcaklığı geçen kullanım uygulamalarında tavsiye edilmemektedirler. Doubleks paslanmaz çeliklerin kullanım sıcaklığı genel olarak -40°C ile 280°C aralığıyla sınırlıdır. Bu zararlı çökeltilerin içerisinde en önemlisi tetragonal yapıda bir Fe- Ni-Cr-Mo bileşiği olan sigma (σ) fazıdır. Sigma fazı esasen bütün paslanmaz çeliklerde meydana gelebilmekte ancak daha çok yüksek krom (>%20 ağırlıkça) içeriğine sahip olan östenitik, ferritik ve doubleks alaşımlarda oluşmaktadır [1].

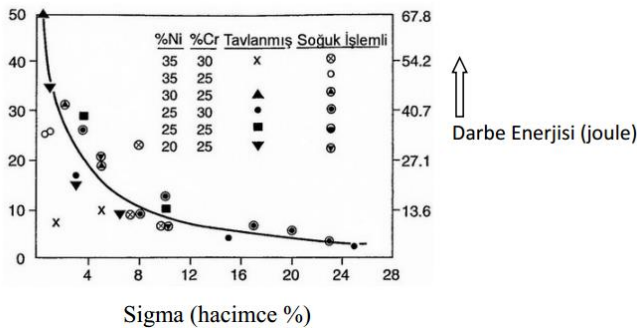
Sigma fazı ve diğer metallar-arası bileşiklerin oluşumu yaklaşık olarak 570°C sıcaklıkta başlamakta ve en hızlı 800°C ile 850°C aralığında gerçekleşmektedir. Alaşımın bileşimine bağlı olarak bu bileşikler 1000°C sıcaklığın üzerinde tekrar çözünmektedirler. Bununla birlikte; %25 civarı Cr içeren doubleks paslanmaz çeliklerde metallar-arası fazların oluşumu çok daha hızlıdır. Sigma fazının oluşumundan kaçınmak için yaklaşık olarak 900°C' den 500°C sıcaklık aralığını hızlı geçiş gerekmektedir. Krom içeriği %20 değerinin altında olan alaşımlarda sigma fazının oluşması için uzun süreler gereklidir [1].

Şekil 1' de 2205 doubleks paslanmaz çelikte sigma fazı oluşumu görülmektedir [3]. Şekil 1-(a)' da 1200°C' de çözelti tavllanmış delta-ferrit ve östenitten oluşan yapı Şekil 1-(b)'de 800°C'de 2 saat tutulmuş ve Şekil 1-(c)'de yine 800°C'de 8 saat tutulmuş yapıdaki sigma fazı (koyu kahverengi) görülmekte açık renkli faz östeniti açık kahve faz delta ferriti temsil etmektedir.

Sigma fazının en hızlı ve yoğun olduğu 800°C sıcaklıkta artan bekleme süresi bu fazın miktarını artırmaktadır [1,2,3,4].

Fe-Cr-Ni alaşımlarında, %5 değerinden daha az bir sigma fazı içeriğinin, darbe enerjisini %50'den fazla azaltabileceği Şekil 2'de; ifade edilmektedir [1].

Ayrıca; krom ve molibden zengin kırılğan yapıda olan olan sigma fazı, paslanmaz çeliklerin darbe enerjilerini düşürmekle beraber korozyon dayanımını da azaltmaktadır [2].



Şekil 2. Sigma faz içeriğinin darbe enerjisine etkileri [1]

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda, 3x25x50mm ebatlarında S32205 (2205) doubleks paslanmaz çelik saclar hazırlanmıştır. S32205

doubleks paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 1' de verilmektedir.

Tablo I.
S32205 doubleks paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi

Element (%ağırlık)					
C	Mn	P	S	Si	Cr
0,031	0,832	0,024	0,004	0,423	24,957
Ni	Mo	Fe	N	Cu	Diğer
6,638	3,511	62,10	0,306	0,2152	0,9588

A. Isıl işleme sigma fazının oluşturulması

Bu çalışmada; sigma fazının en hızlı ve yoğun olduğu 800°C sabit sıcaklıkta S32205 doubleks paslanmaz çelik numunelere 5.5 saat ve 16 saat süreyle ısıl işlem uygulanmıştır. Homojen ısıl işlem uygulaması amacıyla ısıl işlem süresince sıcaklığın sürekli sabit tutulduğu gözlenmiştir.

B. Mikroyapısal incelemeler

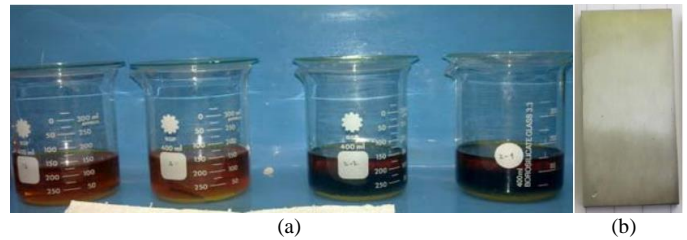
Mikroyapısal incelemeler için, 'Doubleks paslanmaz çeliklerde zararlı metallar-arası fazların tespiti' başlıklı ASTM A923 [5] standardından faydalanılmıştır. Numuneler; %40NaOH içeriğine sahip çözeltide elektrolitik dağlama sonrası optik metalurji mikroskobunda 500X büyütme kadar incelenmiştir. Bununla birlikte fazların hacimce miktarsal analizleri için metalurji mikroskobunda 'Kameram' ve 'Metalim' yazılımları yardımıyla 'Faz (görüntü) analizleri uygulanmıştır.

C. Korozyon Testi

ASTM A923 standardına göre 2205 doubleks paslanmaz çelik saclarakorozyon (ağırlık kaybı) testi uygulanmıştır.

Ana malzemede ve iki farklı koşullarda uygulanan ısıl işlemler sonrasında korozyon test numuneleri ASTM A923 standardına göre temizlenerek bütün ebatları ölçülmüş toplam yüzey alanı hesaplanmış ve her numune test öncesi 0,001g hassasiyetinde terazide tartılarak ağırlığı tespit edilmiştir. FeCl₃.H₂O+saf su karışımı korozyon test çözeltisi PH derecesi 1.3 olacak şekilde hazırlanmış ve numuneler 24 saat süreyle laboratuarda 22°C sıcaklıkta bu çözeltide bekletilmiş, oluşan korozyon ürünleri temizlendikten sonra tekrar terazide tartılmışlardır.

Korozyon test numunelerinin cam kap içerisinde bekletilirken örnek görüntüleri Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. (a) Korozyon testinin yapılışı (b) test numunesi

D. Korozyon deney sonuçlarının analitik hesaplanması

ASTM A923 standardında korozyon miktarı (mdd) tespiti için ağırlık kaybına göre hesaplama yapılan eşitlik (Bkz. Eş 1.) kullanılmaktadır.

Korozyon hızı (mdd)=Ağırlık Kaybı (mg)/numune toplam yüzey alanı (dm²) x zaman (gün) (Eş.1)

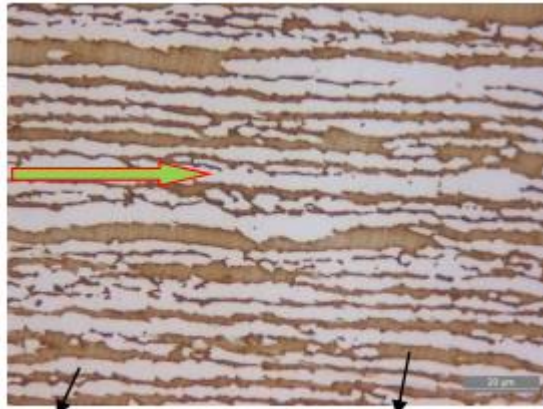
Test numunelerinin hesaplanmış olan toplam yüzey alanları, testöncesi ve test sonrası ağırlık ölçümleri farkı (ağırlık kaybı) ile birlikte test süresi 1 gün esas alınarak Eşitlik 4.2' de yerine koyulmakta ve her test numunesi için ayrı hesap yapılmaktadır.

Hesaplama sonrası çıkan değerler ASTM A923'e göre 10 mdd değerinden yüksek ise malzemede risk oluşturabilecek düzeyde zararlı metaller-arası faz veya bileşiklerin olabileceği ifade edilmektedir. Bulunan sonuç 10 mdd değerinin altında ise testin bir kez daha tekrarına izin verilmektedir.

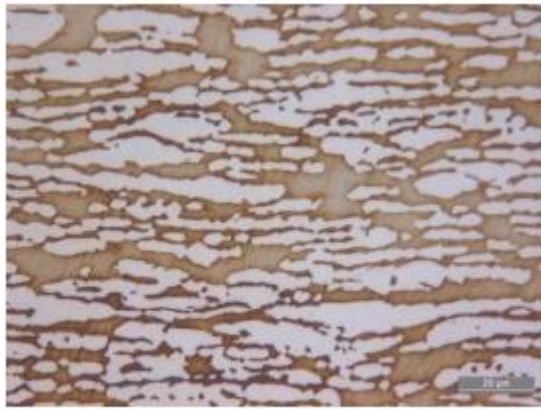
III. DENEYSEL SONUÇLAR

A. Mikroyapısal incelemeler ve faz analizleri

2205 dubleks paslanmaz çelik ana malzemenin temin edilmiş haliyle mikroyapı görüntüleri Şekil 4' de verilmektedir.



(a) Östenit (beyaz) δ-ferrit (kahverengi)



(b)

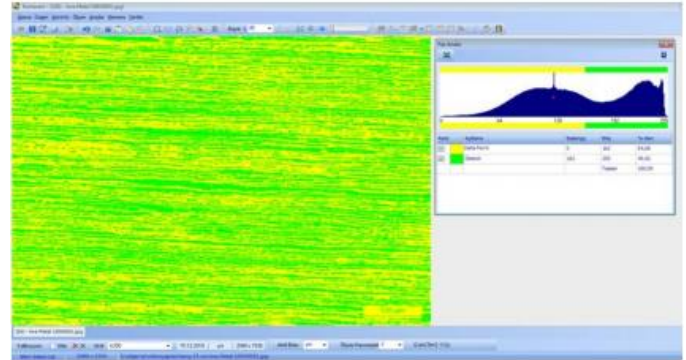
Şekil 4. İşlem görmemiş ana malzeme (a) boyuna (b) enine hadde yapısı (500X)

Şekil 4-(a) ve (b)' de dubleks paslanmaz çeliğin hadde yönü görülmektedir. Mikroyapısal incelemelerde; işlem görmemiş ana malzemede başka bir faza veya metaller-arası bileşiğe rastlanmamıştır.

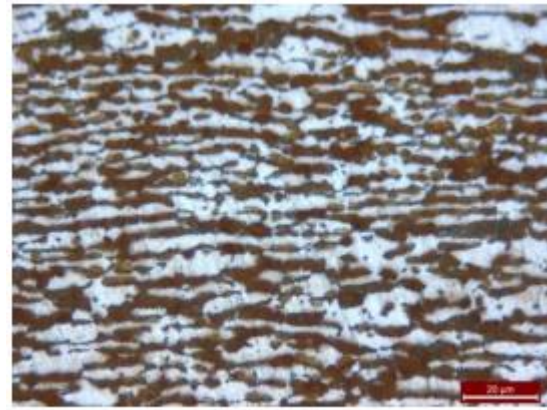
ASTM E562 [6] ve ASTM E1245 [7] standartlarına göre uygulanan faz (görüntü) analizi sonucunda temin

edilmiş haliyle S32205 dubleks paslanmaz çelik ana malzemede, ortalama %54,08 δ-ferrit ve %45,92 östenit fazlarına sahip olduğu bulunmuştur

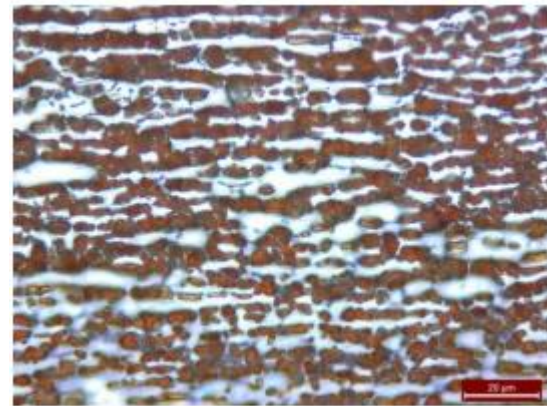
Ana malzemenin 100x büyütme kapasitesinde uygulanan metalografik faz analiz sonucu Şekil 5' de görülmektedir. Faz analizi sonucunda Şekil 5'de görülen ana malzemede yeşil faz östeniti sarı faz ise delta ferriti temsil etmektedir.



Şekil 5. Ana malzeme faz analizsonucu (%54,08 δ-ferrit ve %45,92 östenit)



(a)



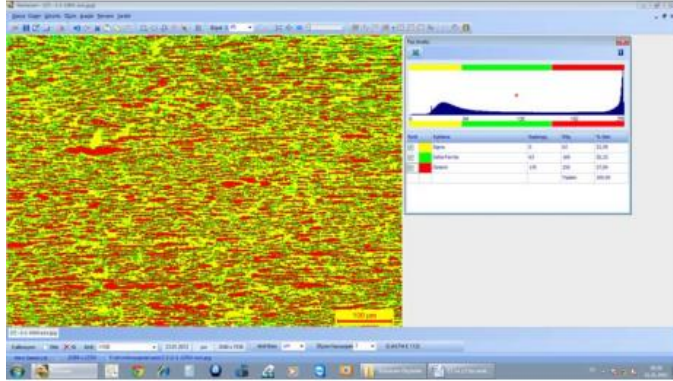
(b)

Şekil 6. Isıl işlem uygulanmış ana malzeme numunelerinin mikro yapı görüntüleri (beyaz: östenit, açık kahve: delta-ferrit, koyu kahve: sigma fazı, 500x) (a) 800°C'de 5.5 h.bekleme ve soğutma, (b) 800°C'de 16 h.bekleme ve soğutma.

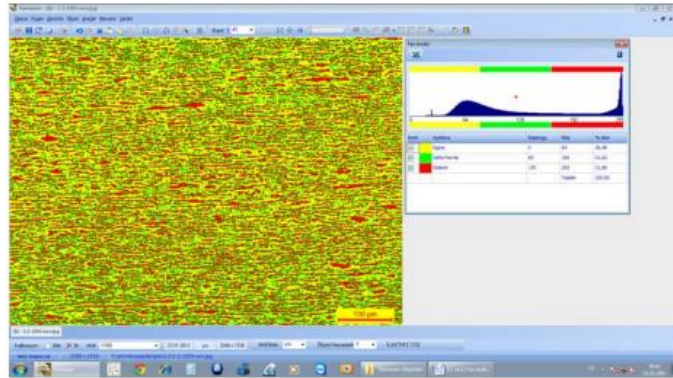
Uygulanan iki farklı ısıl işlemler sonrasında numunelerde oluşan sigma fazı mikroyapı görüntüleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, yapıda açık renkli (beyaz) olanlar östenit, açık kahve renkli olanlar delta ferrit ve koyu kahve renkli yapılar ise sigma fazını göstermektedir. Artan ısı işlem süresi ile, oluşan sigma fazının boyutlarının da arttığı görülmektedir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda sigma fazının 570°C-1000°C aralığında oluştuğunu ve bu oluşumun en hızlı 800°C -850°C' de meydana geldiğini belirtmişlerdir [1].

Çalışmada, Şekil 7 ve Şekil 8'de sırasıyla iki ana malzemeye uygulanan 800°C sıcaklıkta 5.5 ve 16 saat bekletilmesi sonrasında numunelerin faz analiz sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 7. 800°C'de 5,5 saat bekletilen ve soğutulan ana malzemenumunesinin faz analizi sonucu (kırmızı: östenit: %37,09, yeşil: delta ferrit: %30,32, sarı: sigma: %32,59)



Şekil 8. 800°C sıcaklıkta 16 saat bekletilen ve soğutulan ana malzeme numunesinin faz analizi sonucu (kırmızı: östenit: %31,89, yeşil:delta ferrit: %31,62, sarı: sigma: %36,48)

Şekil 7 ve Şekil 8' de görüldüğü gibi, iki ayrı ana malzemeye uygulanan 800°C sıcaklıkta 5,5 saat bekleme ve soğutma ısı işlemi sonucunda elde edilen numuneye yapılan faz analizinde %32,59 sigma fazı tespit edilirken, 800°C'de 16 saat bekleme ve soğutma ısı işlemi uygulanan numunede ise %36,48 sigma fazı tespit edilmiştir. Sigma fazının en hızlı oluştuğu 800°C sıcaklıkta artan sürelerle bulunma sigma fazı oranını artırmıştır.

Ana malzeme ile birlikte iki farklı ısı işlem numunesinin faz analizleri sonuçları Tablo 2' de görülmektedir.

Tablo II.
Faz analiz sonuçları

Numune	ASTM E562 ve ASTM E1245 Faz (görüntü) analiz sonucu (% hacimce)		
	Östenit	δ-ferrit	sigma (σ)
Ana malzeme	45,92	54,08	---
800°C'de 5,5 saat bekleme ve soğutma	37,09	30,32	32,59
800°C'de 16 saat bekleme ve soğutma	31,89	31,62	36,48

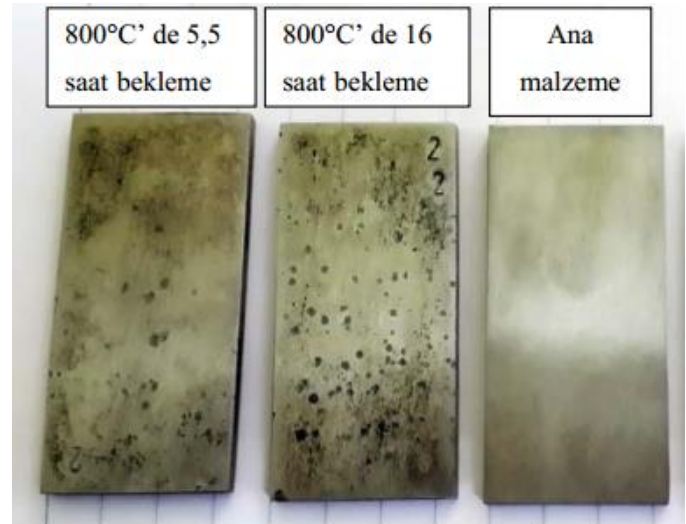
800°C sıcaklıkta artan bekleme süresi sigma fazı miktarını artırmaktadır. Sigma fazı ferritten veya yarı-kararlı östenitten çekirdeklenmektedir. Ayrıca ferrit östenitten daha fazla krom içeriğine sahip olduğundan ferritin varlığı sigma fazı oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Bundan dolayı; Tablo 2' deki sonuçlardan, artan sigma fazının delta-ferriti östenite göre daha çok tükettiği anlaşılmaktadır [1,8].

B. Korozyon Test Sonuçları

ASTM A923 standardına göre uygulanan korozyon (ağırlık kaybı) test sonuçları aşağıda Tablo 3' de verilmektedir.

Ana malzeme korozyon testinden etkilenmemiştir. Korozyon testinde cam kap içerisindeki çözeltiye bırakılan numunelerin cam tabanına temas eden yüzeylerinde damlacıklar halinde bulunan korozif demir-klörür çözeltisi alt yüzeylerde çukurcuk korozyonuna sebep olmuştur.

Şekil 9' da, ısı işlemisiz ana malzemede herhangi bir korozyon durumu oluşmazken ısı işlemle sigma fazı oluşturulan numunelerde ısı işlem süresi arttıkça korozyon miktarının arttığı görülmektedir.



Şekil 9. 800°C' de 5,5 ve 16 saat bekletilen ve soğutulan numunelerle, ana malzemenin korozyon testi sonrası yüzey durumları

Korozyon miktarı (1-Ana Malzeme): (0,0000) g / 0,27570752 (dm²) x1 (gün) = 0,0000 mdd.

Korozyon miktarı (2.1): (0,3469) g / 0,27672510 (dm²) x 1 (gün) = 1253,6 mdd.

Korozyon miktarı (2.2): (0,385) g / 0,27575352 (dm²) x 1 (gün) = 1396,17 mdd.

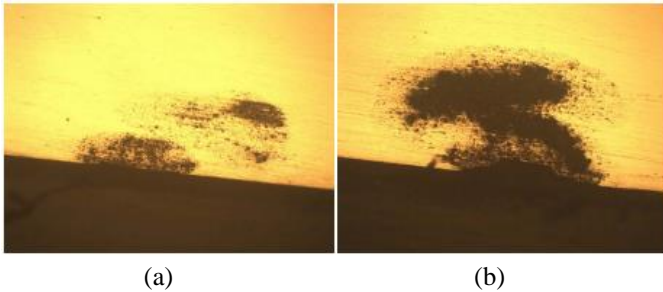
Tablo III. ASTM A923 Korozyon (ağırlık kaybı) test sonuçları

Numune No	Numune Boyutları (mm)	Toplam Yüzeysel Alanları (dm ²)	Test Öncesi Ağırlık 1.Tartım(g)	Test Öncesi Ağırlık 2.Tartım(g)	Test Öncesi Ağırlık 3.Tartım(g)	Test Öncesi Ağırlık Ortalama (g)	Test Sonrası Ağırlık 1.Tartım (g)	Test Sonrası Ağırlık 2.Tartım (g)	Test Sonrası Ağırlık 3.Tartım (g)	Test Sonrası Ağırlık Ortalama (g)
1 (ana malzeme)	2,92x23,43x49,72	0,27570752	25,6975	25,6977	25,6976	25,6976	25,6977	25,6976	25,6975	25,6976
2.1 (5,5 saat)	2,95x23,50x49,69	0,27672510	26,5029	26,5030	26,5030	26,5030	26,1561	26,1561	26,1560	26,1561
2.2 (16 saat)	2,88x23,49x49,72	0,27575352	25,4963	25,4963	25,4964	25,4963	25,1113	25,1113	25,1113	25,1113

Östenit fazının klor içeren ortamlara karşı zayıflığı, ferrit fazının ise bu klor içeren test ortamına östenite göre daha dayanıklı oluşu, korozyon test çözeltilerindeki klor iyonlarının östeniti daha fazla korozyona uğrattığı sonucunu ortaya çıkarmaktadır [1].

Şekil 10-(a) ve (b) ile Şekil 11’de 800°C sıcaklıkta sırasıyla 5,5 ve 16 saat bekletilen ve soğutulan numunelerde tespit edilen çukurcuk korozyon örnek şekilleri ve boyutları gösterilmektedir.

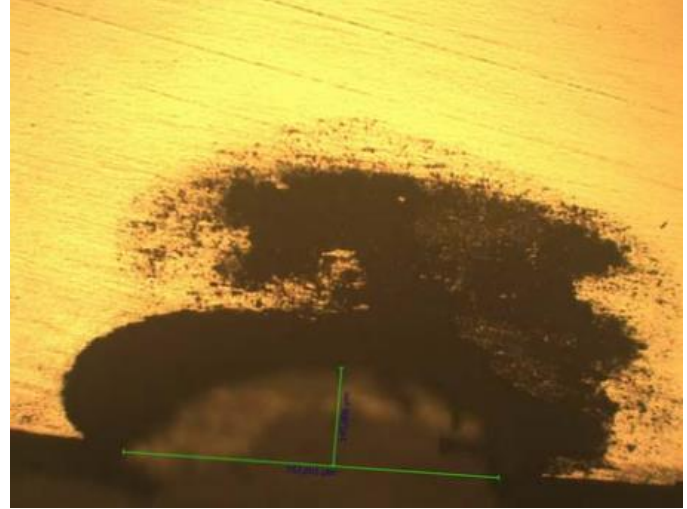
Şekil 10-(a) ve (b)’ de görülen, 800°C sıcaklıkta 5,5 saat bekletilmiş ve soğutulmuş numunede oluşan çukurcuk örneklerinden anlaşılacağı gibi; ısıtım sonrası oluşan sigma fazı, demirklorür esaslı (FeCl) korozyon testçözeltilisine karşı tepki göstererek yukarıda Şekil 9’ da Şekil 10’ da verilen örnek makro-yapı fotoğraflarında gösterildiği gibi numuneyi tahrip etmiştir.



Şekil 10-(a) ve (b) 800°C sıcaklıkta 5,5 saat bekletilmiş ve soğutulmuş numunede çukurcuk korozyonu örnek görüntüleri

800°C sıcaklıkta 16 saat bekletilmiş ve soğutulmuş numunede oluşan sigma fazının yol açtığı tahribat sonrasında meydana gelen çukurcuk boyutları Şekil 11’ de gösterilmektedir.

Şekil 11’ de, 800°C sıcaklıkta 16 saat bekletilerek sigma fazı oluşturulan numunedeki çukurcuk korozyonu örneğinde, çukurcuk boyutları yaklaşık olarak 0,557 mm genişlikte ve 0,145 mm derinlikte tespit edilmiştir. Artan ısıtım süresi sigma faz oranını ve yol açtığı korozif tahribatı artırmıştır



Şekil 11. 800°C’de 16 saat bekletilen ana malzemede çukurcuk korozyonu görüntüsü (çukurcuk genişliği: 557,001µm, çukurcuk derinliği: 145,006 µm)

IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

İşlem görmemiş S32205 dubleks paslanmaz çelik ana malzemede ASTM E562 ve ASTM E1245 standartlarına göre uygulanan mikroyapısal faz (görüntü) analizi sonucunda, ortalama %54,08 δ-ferrit ve %45,92 östenit fazları tespit edilmiştir.

İşlem görmemiş ana malzeme mikroyapıları ile birlikte, ana malzemeye iki farklı ısıtım uygulayarak oluşturulan sigma fazının mikroyapıları literatürbenzerlik göstermektedir [1, 2, 3, 4, 9].

Ana malzemede sigma fazına rastlanmamış, 800°C sıcaklıkta 5,5 ve 16 saat ısıtım uygulanmış numunelerde, faz analizi sonucunda sırasıyla; hacimce %32,59 ve %36,48 sigma fazı tespit edilmiştir. Bir Fe-Cr bileşiği olan sigma fazı dubleks paslanmaz çeliklerde en hızlı 800°C sıcaklıkta oluşabilmekte ve bu sıcaklıkta artan bekleme süresi sigma fazı içeriğini artırmıştır.

Sigma fazı, tercihen kromun daha çok miktarda bulunduğu delta-ferrit fazından çekirdekleneceğinden dolayı numunelerin faz analiz sonuçlarına göre artan sigma fazı miktarı, delta ferritin içeriğini östenite göre daha fazla azaltmıştır [1, 2].

Bununla birlikte; bir Fe-Cr bileşiği olan sigma fazının tercihen delta ferrit içerisinde çökmesi nedeniyle delta ferrit içeriğinin dubleks paslanmaz çeliklerde östenitle olan denge

bileşimini (%50-%55) geçmesi durumunda bir başka ifadeyle delta ferritin miktarının ana malzemenin denge oranlarını geçmesi durumunda sigma fazının delta ferrit içerisinde çökelme olasılığı artacak ve malzemenin korozyon ve mekanik dayanım özellikleri de o oranda azalacaktır.

Yapılan bir çalışmada; araştırmacılar, hidroklorik asit gibi indirgeyici ortamlarda sigma fazındaki korozyon miktarının delta-ferritten ortalama 3 kat fazla olduğunu, bunun yanında H₂SO₄ ve HNO₃ gibi oksitleyici ortamlarda sigma fazının delta-ferrite göre 42 kata kadar daha fazla tahribata yol açtığını ve buna karşın FeCl₃ gibi çukurcuk korozyonu oluşturan ortamlarda ise delta-ferritin çözeltiden etkilenmediğini ancak sigma fazının tahribata yol açtığını vurgulamışlardır [10].

Ana malzeme korozyon testinden etkilenmemiştir. İşlem görmemiş ana malzemenin denge faz dağılımları optimum korozyon ve mekanik dayanım için çözeltiye alma ve su verme işlemleri sonucunda tertip edildiğinden korozyon dayanımında beklenen bu durum meydana gelmiştir.

Çalışmada iki farklı ısıl işleme ana malzemede oluşturulan sigma fazı korozyon testleri sonuçlarından da görüleceği üzere malzemede korozif tahribata yol açmıştır. Ayrıca artan sigma fazı içeriği korozyon dayanımını daha da düşürmüştür.

Dubleks paslanmaz çeliklerin üretimleri sonrasında mevcut olan tatminkar korozyon ve mekanik dayanımlarını koruyabilmek amacıyla yaklaşık olarak yarı yarıya delta ferrit-östenit faz oran dağılımlarını kaynak, sıcak kullanım koşulları gibi termal prosesler sonrasında da muhafaza edebilmek için, sigma fazı ve diğer zararlı çökeltilerin oluşum sıcaklıkları ve bu sıcaklıklarda bekleme sürelerine dikkat etmek malzemenin korozyon dayanımını koruması için yararlı olacaktır.

Yüksek kromlu (>%20) paslanmaz çeliklerde; sigma fazı oluşumunun en hızlı olduğu sıcaklık aralıklarında (800°C ile 850°C) sadece birkaç saat bulunma ile sigma fazı kolaylıkla ve daha hızlı bir şekilde meydana gelebilmektedir [11]. Dupleks paslanmaz çeliklerde; gerek kullanım gerekse imalat koşullarından dolayı meydana gelebilecek başta sigma olmak üzere zararlı metaller-arası bileşiklerin yapıda çözündürülüp giderilmesi için çözeltiye alma ve suda soğutma ısıl işlemi uygulanması fayda sağlayacaktır.

Araştırmacılar; 2205 dupleks paslanmaz çelikler ile ilgili yaptıkları çalışmalarda, 1120°C-1150°C sıcaklık aralığında uyguladıkları ısıl işlemin mevcut sigma fazını tamamen giderdiğini belirlemişlerdir [12].

V. Kaynaklar

- [1] J. Lippold and D. Kotecki: Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, Wiley Interscience Publications, New Jersey (2005)
- [2] Gunn N. Robert: Duplex Stainless Steels, Microstructures, Properties and Applications, Abington Publishing, Cambridge, England (2003)
- [3] ASM Handbook Vol.9, Metallography and microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels, p.670-1656, USA, (2004)
- [4] F.Tehovnik ve arkadaşları, Microstructure evolution in SAF

2507 Superduplex Stainless Steel, Slovenia, (2011)

[5] ASTM A 923-08 'Standart Test Methods for Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Duplex Stainless Steels, USA, (2008)

[6] ASTM E-562-11, Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count, (2011)

[7] ASTM E 1245-03, Standard Practice for determining the Inclusion or Second Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis (Re-approved 2008)

[8] Pierre R. Roberge, Handbook of Corrosion Engineering, Chapter 8, 734, Materials' Selection, McGrawHill Publications, (2000)

[9] Welding Brazing and Soldering, ASM Metals Handbook Vol.6. ASM International, USA, (1993)

[10] J.D.Fritz, Effects of metallurgical variables on the corrosion of stainless steels, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, Vol. 13-A, ASM Handbook, ASM Int.,(2003)

[11] Shortsleeve F.J, and Nicholson M.E, Transformations in ferriticchromium steels between 595-815°C, ASM,(1951)

[12] Kotecki, D.J, Heat treatment of duplex stainless steels, 68 (11), 431-441, Welding Journal, (1989)