


1.4462 (AISI 2205) dubleks paslanmaz çelikte ısıtılma koşullarının faz değişimi, sertlik ve korozyon davranışı üzerine etkilerinin incelenmesi

Investigation of the effects of heat treatment conditions on phase change, hardness and corrosion behavior in the 1.4462 (AISI 2205) duplex stainless steel

Gökhan Özer^{1,*} 

¹Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi (ALUTEAM), Haliç Yerleşkesi, 34445, Beyoğlu, İstanbul

Özet

Paslanmaz çelikler günümüzde son derece önemli bir yapı malzemesidir. İçerdiği çift faz ile dubleks paslanmaz çelikler son yıllarda oldukça öne çıkan bir malzeme türü olmuştur. 1.4462 paslanmaz çelikleri üstün korozyon ve mekanik özellikler göstermesine rağmen yüksek sıcaklık uygulamalarında mikroyapıdaki faz dönüşümleri kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Bu çalışmada, 1.4462 dubleks paslanmaz çeliğine yüksek sıcaklık ısıtılma uygulanan mikroyapıdaki faz dönüşümlerinin sertlik ve korozyon özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla ısıtılma uygulanmış numunelere optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskopu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS), sertlik ve elektrokimyasal korozyon deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklıklarda oluşan ikincil fazların malzemenin mekanik ve korozyon özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dubleks paslanmaz çelikler, 1.4462, Faz değişimi, Korozyon davranışı

Abstract

Stainless steels are significant building material today. With the double phase, it contains, duplex stainless steels (DSS) have become a very prominent material type in recent years. Although 1.4462 stainless steels show superior corrosion and mechanical properties, their usage areas are limited in high-temperature applications due to phase transformations in the microstructure. In this study, by applying high-temperature heat treatment to 1.4462 duplex stainless steel, the effects of phase transformations in the microstructure on hardness and corrosion properties were investigated. For this purpose, optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), hardness and electrochemical corrosion tests were performed on heat-treated samples. According to the results, it was determined that secondary phases formed at high temperatures affect the mechanical and corrosion properties of the material.

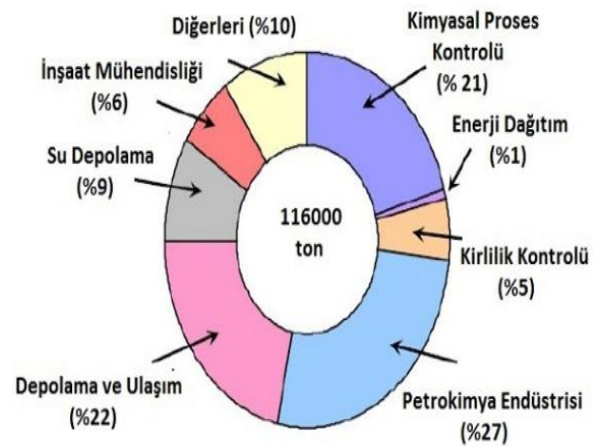
Keywords: Duplex stainless steel (DSS), 1.4462, Phase change, Corrosion behaviour

1 Giriş

Paslanmaz çelikler günümüzde oldukça tercih edilen bir yapı malzemesidir. Bunun başlıca sebebi paslanmaz çeliklerin sahip olduğu üstün korozyon dayanımı ve mekanik özellikleridir [1, 2]. Paslanmaz çelikler genelde 5 ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar; Östenitik, Martenzitik, Ferritik, Dubleks (çift fazlı) ve çökelme sertleşmesi uygulanabilen çeliklerdir. Bunların arasında dubleks paslanmaz çelikler son yıllarda daha çok önem kazanmaktadır. Dubleks paslanmaz çeliklerin adı yapısında bulundurduğu iki fazdan (ferrit + östenit) dolayı Latince'deki "iki parçalı" anlamından gelmektedir. Bu çelikteki östenit fazı genel korozyon dayanımı ve süneklik sağlarken, ferrit fazı mekanik dayanımı ve kaynak kabiliyetini sağlamaktadır [3-5]. Dubleks paslanmaz çelikler sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle günümüzde kimyasal, petrokimyasal, güç, iletişim, gaz ve petrol dağıtım boruları gibi pek çok uygulama alanında kullanılmaktadır (Şekil 1) [6, 7].

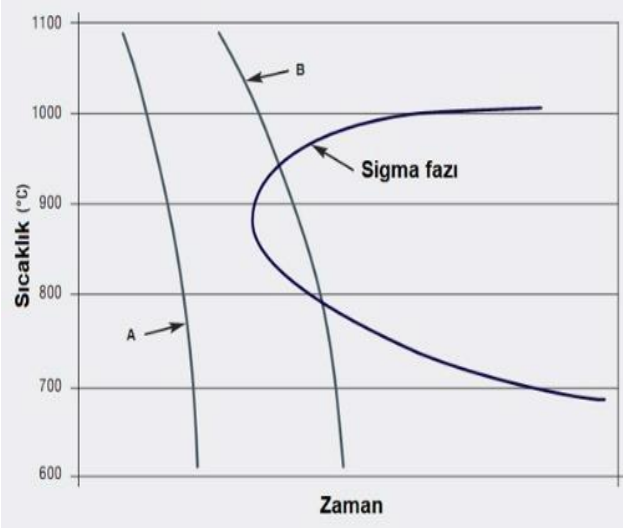
Dubleks paslanmaz çelikler ferrit fazındaki hızlı difüzyon oranı ve yüksek miktarda alaşım elementleri içermesinden dolayı intermetalik fazların çökmesine son derece uygun bir malzemedir. Bu çelikler 600-1000 °C arasında sıcaklık değişimine maruz kaldıklarında ikincil faz oluşumuna karşı hassas hale gelmektedir [8-10]. İkincil fazların oluşumu malzemede ferrit-östenit dengesini bozmakta ve bu da mekanik ve korozyon özelliklerini

olumsuz etkilemektedir [11]. Dubleks paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklık uygulamasını kısıtlayan en önemli faz sigma (σ) fazıdır. Bu faz, 600-950°C sıcaklıkları arasında oluşup 1000°C üzerinde tekrar çözülür. Sigma fazı Fe-Cr-Ni-Mo tetragonal yapısında bir intermetalik fazdır [12]. Yaklaşık 1000°C-500°C arasındaki sıcaklıklardaki soğuma yavaş yapılırsa sigma fazı oluşmaktadır (Şekil 2-B eğrisi). Bu fazdan korunmak için bu sıcaklık aralığı hızlı geçilmelidir (Şekil 2-A eğrisi) [13].



Şekil 1. Dubleks paslanmaz çelik kullanım alanları [6]

* Sorumlu yazar / Corresponding author, Tel.: +90 (212) 521 81 00, e-posta / e-mail: ozergokhan@gmail.com (G. Özer)
Geliş / Received: 06.10.2020 Kabul / Accepted: 01.12.2020 Yayımlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngmuh.806495



Şekil 2. Soğuma hızına bağlı olarak oluşan sigma fazı [13]

Sigma fazı oluşumunu teşvik eden elementler Mo ve Cr'dur. Bu etki, daha yüksek alaşımlı serilerde (2205 DSS gibi) daha belirgindir. Sigma fazı tercihli olarak ferrit/östenit ara yüzeyinde oluşmaktadır [9, 14]. Sigma fazı özellikle malzemenin korozyon, tokluk ve süneklik değerlerini düşürmektedir [15].

2 Materyal ve metot

2.1 Kullanılan malzeme ve numune hazırlama

Çalışmada 1.4462 (AISI 2205) dubleks paslanmaz çelik kullanılmıştır. Kullanılan numunelerin kimyasal analizi Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. 1.4462 kimyasal analizi (% ağırlıkça)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Ni	N	W	P	Fe
0.02	0.5	1.4	22.7	3.2	0.5	5.1	0.15	0.04	0.03	Kal.

Numuneler 20x20x10 mm boyutlarında kesilmişler ve Tablo 2' de verilen koşullarda ısıl işleme tabi tutulmuşlardır.

Tablo 2. Isıl işlem parametreleri

Numune	Isıl işlem durumu
İşlemsiz	Isıl işlemsiz
Suda soğutulmuş	1200°C/30 dak. + suda soğutma
Fırında soğutulmuş	1200°C/30 dak. + fırında soğutma

Bütün numuneler standart metalografik numune hazırlama prosedürüne göre hazırlanmıştır. Bunun için 60-1200 mesh SiC zımparalar kullanılmıştır. Zımparalanan numuneler sırasıyla önce 6 µm daha sonra 1 µm elmas pasta ile parlatılıp ayna yüzey olarak hazırlanmıştır. Parlatılan numuneler Struers LectroPol-5 elektrolitik parlatma ve dağlama cihazında %5 KOH solüsyonu ile 3.0 V/5 sn. dağlanmıştır.

2.2 Mikroyapı ve faz analizi

Dağlanan numunelerin optik mikroyapı görüntüleri Zeiss Axio Lab. A1 ters metal mikroskobu ile çekilmiştir. Numunelerin faz oranları mikroskobun image analysis yazılımı ile ölçülmüştür. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Hitachi SU3500 model elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. Enerji dağılımlı X- ışını spektroskopisi (EDS) analizleri Oxford XACT-EDS modülü ile nokta analizi yöntemiyle yapılmıştır.

2.3 Sertlik

Sertlikler Shimadzu G21D marka mikrovickers akredite sertlik cihazında "TS EN ISO 6507:2018 Metalik malzemeler-Vickers sertlik deneyi" standardına göre 300 gr. yük altında ve 10 saniye temas süresi uygulanarak her bir numunede 5 ölçüm olarak yapılmış ve ortalama değerleri verilmiştir. Dubleks paslanmaz çelikler sert bir malzeme olduğu ve mikroyapısında farklı fazların bulunmasından dolayı yük olarak yüksek ağırlık seçilmiştir (300 gr), böylece ölçümler bütün fazları kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

2.4 Korozyon deneyleri

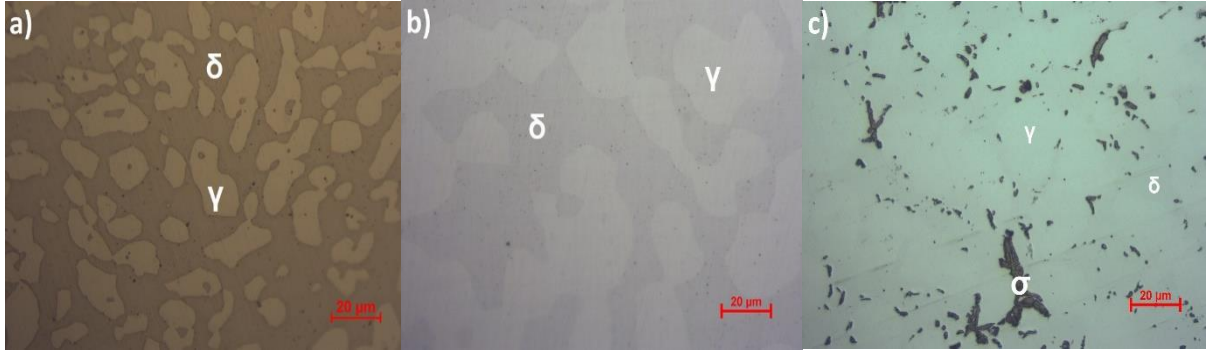
Korozyon deneyleri için IVIUM Vertex EIS 1A/10V potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılmıştır. Numuneler 1cm² yüzey alanı ve ayna yüzey olarak hazırlanmıştır. Numuneler ilk olarak 30 dakika açık devre potansiyeline (OCP) tabi tutulduktan sonra deney başlatılmıştır. Korozyon çözeltisi olarak %3.5 NaCl solüsyonu kullanılmıştır. Korozyon hızları ve potansiyelleri Tafel eğrileri yardımıyla IviumSoft programı ile hesaplanmıştır. Korozyon deneyleri "ASTM G1-03 (2017) Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens" ve "ASTM G5-14e1 (2015) Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements" standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

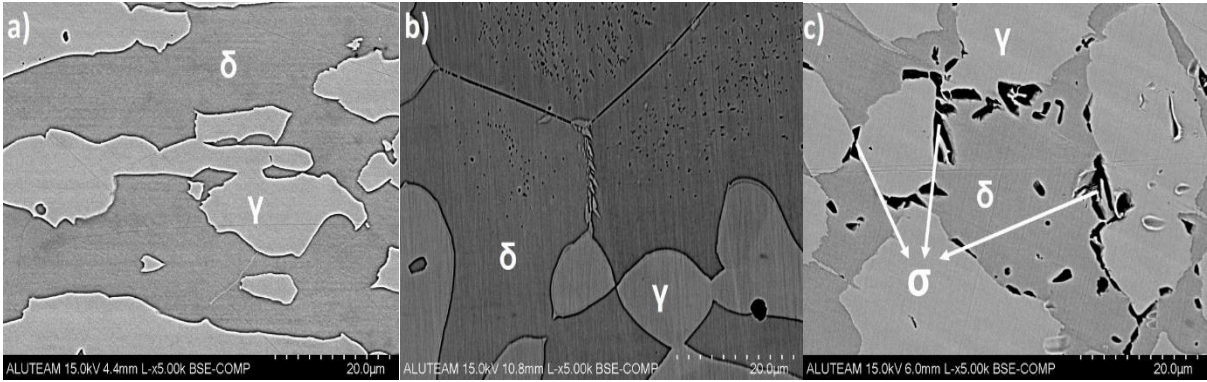
3.1 Mikroyapı ve faz analizi

Şekil 3'te optik mikroyapılar görülmektedir. Şekil 4' de SEM mikroyapıları verilmiştir. Şekil 3 ve 4' de, koyu gri bölgeler δ-ferriti, açık renkli bölgeler östeniti (γ) ve tane sınırlarında dağılmış siyah bölgeler ise (Şekil 3c) sigma (σ) fazını göstermektedir. Şekil 3 ve 4' de görüldüğü gibi işlem görmemiş ve suda soğutulmuş numunelerde (Şekil 3a ve 3b) mikroyapıda sigma fazı yoktur, oysa fırında soğutulmuş numunede sigma fazı oluşmaktadır. Sigma fazı tane sınırlarında oluşmuştur.

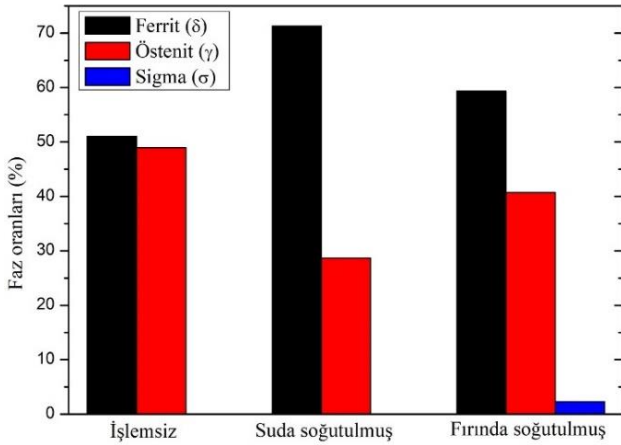
Şekil 5 numunelerin faz oranlarını göstermektedir. Faz oranları (Şekil 5) mikroyapı görüntülerini doğrulamaktadır. İşlem görmemiş ve suda soğutulmuş numunelerde sigma fazı oluşmazken, fırında soğutulmuş numunede %2.308 oranında sigma fazı oluşmaktadır. Fırında soğutulmuş numunede %59.308 ferrit, %38.384 östenit bulunurken, suda soğutulmuş numunede bu oran %71.306 ferrit, %28.694 östenit olarak ölçülmüştür. İşlemsiz numunedeki ferrit/östenit faz oranı hemen hemen yarı yarıyadır (%51.03/%48.96).



Şekil 3. Optik mikroyapı görüntüleri, a) işlemsiz, b) suda soğutulmuş, c) havada soğutulmuş numune



Şekil 4. SEM mikroyapı görüntüleri, a) işlemsiz, b) suda soğutulmuş, c) havada soğutulmuş numune



Şekil 5. Numunelerin faz oranları

Dubleks paslanmaz çelikler denge halinde yapılarında %50 ferrit, %50 östenit bulundurlar [16-18]. Dolayısıyla, bu durum dubleks paslanmaz çelik için beklenen bir özelliktir. Yüksek sıcaklıkta (>1000°C) ferrit/östenit faz dengesi ferrit lehine değişmektedir. Böylesi halinde yapılarında %50 ferrit, %50 östenit bulundurlar [16-18]. Dolayısıyla, bu durum dubleks paslanmaz çelik için beklenen bir özelliktir. Yüksek sıcaklıkta (>1000°C) ferrit/östenit faz dengesi ferrit lehine değişmektedir. Böylesi bir mikroyapı hızlı soğutulduğunda bu oran oda sıcaklığında da korunmuş olur. 1200°C sıcaklıktan suda soğutulmuş numunede ferrit fazının yüksek çıkmasının nedeni budur.

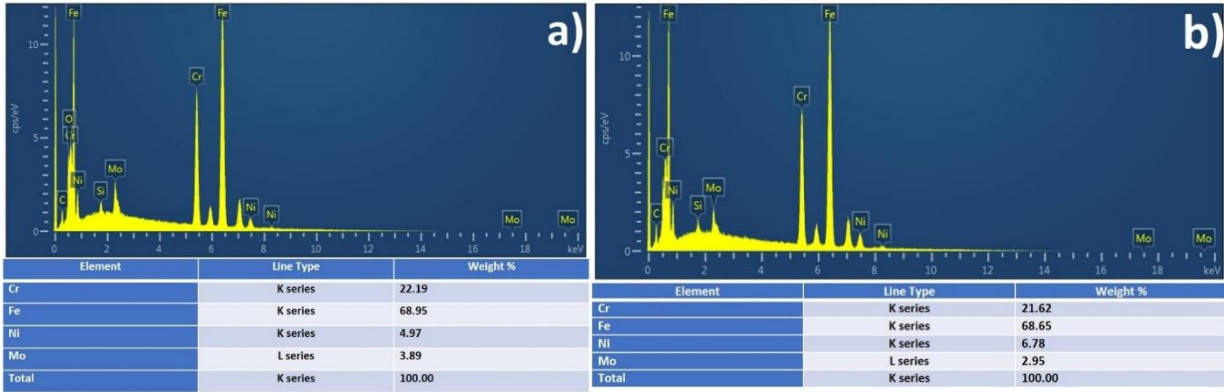
1200°C sıcaklıktan fırında soğutulmuş numunede ise ferrit fazı parçalanarak östenit ve sigma fazına dönüşür [19-21].

Şekil 6'da suda soğutulmuş numunede yapılan EDS sonuçları görülmektedir. Ferrit ve östenit fazlarında Cr, Ni ve Mo bulunmaktadır. Ferrit fazında (Şekil 6a) Cr ve Mo oranları daha yüksektir. Östenit fazında ise Ni daha yüksek orandadır (Şekil 6b).

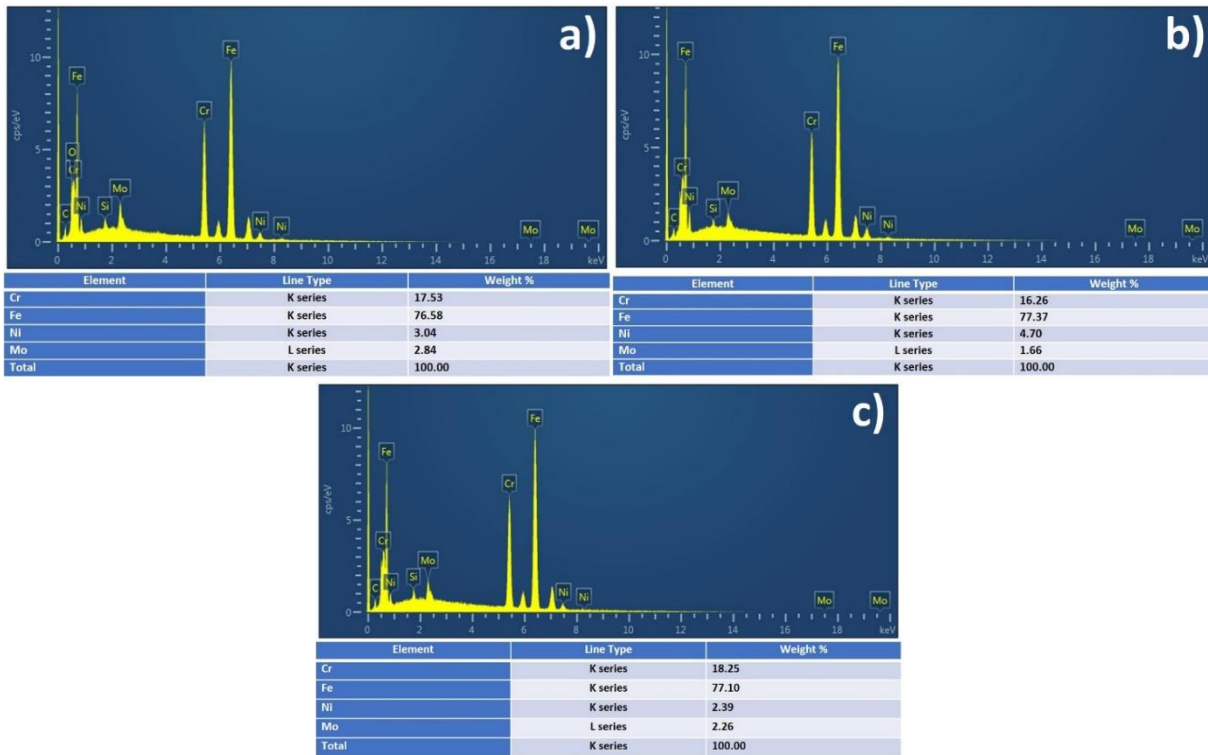
Şekil 7'de fırında soğutulmuş numunedeki faz oranlarının EDS sonuçları görülmektedir. Fırında soğutulmuş numunede ferritteki Cr miktarı (Şekil 7a) suda soğutulmuş numuneye göre (Şekil 6a) daha düşüktür. Bunun nedeni sigma fazının ferrite doğru büyüme eğilimidir. Yani, sigma fazı ferritteki Cr elementini kendine çekmekte, bu da ferritteki Cr oranını azaltırken sigma fazında Cr oranını artmaktadır (Şekil 7c).

3.2 Sertlik

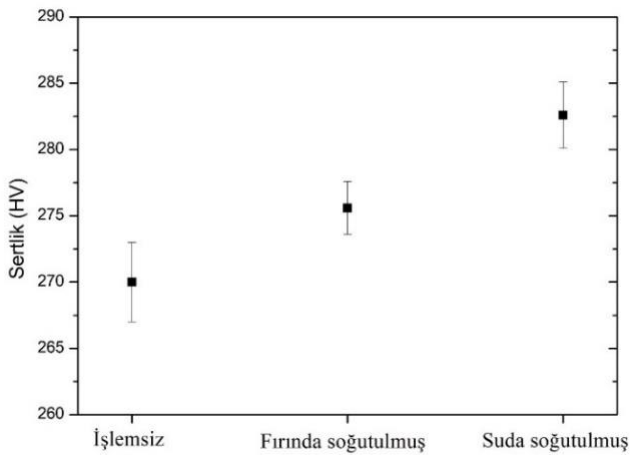
Şekil 8'de sertlik sonuçları görülmektedir. Sertlik sonuçları incelendiğinde su ve fırında soğutulmuş numunelerin değişik sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum mikroyapıdaki ferrit oranıyla alakalıdır. Dupleks paslanmaz çeliklerde sertliği artırıcı ana faz ferrittir. Suda soğutulmuş numunede ferrit oranı oldukça yüksektir ve bu da sertliğin yüksek çıkmasına neden olmaktadır (282.6 Hv). İşlemsiz numunede ferrit/östenit dengeli bir orandadır ve sertlik ısı işlem görmüş numunelerden düşük çıkmıştır (270 Hv). Suda soğutulmuş numunede sigma fazı olmasına rağmen bu oran çok düşük olduğundan sertliği çok artırıcı etkisi olmamıştır (275.6 Hv).



Şekil 6. Suda soğutulmuş numunede a) ferrit, b) östenit fazlarının EDS analiz sonucu



Şekil 7. Fırında soğutulmuş numunede a) ferrit, b) östenit, c) sigma fazlarının EDS analiz sonucu

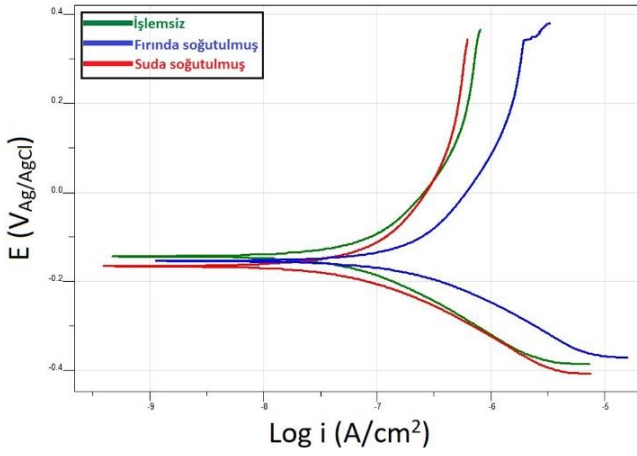


Şekil 8. Sertlik sonuçları

3.3 Korozyon analizi

Şekil 9 ve Tablo 3' de korozyon sonuçları verilmiştir. Şekil 9'daki Tafel eğrileri ve Tablo 3'deki potansiyodinamik polarizasyon sonuçlarında görüldüğü gibi, korozyon başlangıç potansiyelleri (E_{corr}) her üç numunede hemen hemen aynıdır. Fakat korozyon ilerleme hızlarında (akım yoğunluğu) fark ortaya çıkmaktadır. En düşük korozyon akımı işlemsiz numunede ortaya çıkmıştır (2.008 A/cm^2). Fırında soğutulmuş numunede ise akım yoğunluğu en yüksektir (5.935 A/cm^2), yani fırında soğutulmuş numune en hızlı korozyona uğrayan numunedir. Bunun nedeni dengeli soğutma sonucu tane sınırında oluşan sigma fazıdır. Polarizasyon dirençleri de (R_p) korozyon dayanımını göstermektedir. R_p değerinin yüksek olması malzemenin korozyona karşı dirençli olduğunu işaret etmektedir. En düşük R_p değeri fırında soğutulmuş numunede (2.366×10^5

ohm) ölçülmüştür. Sonuç olarak, sigma fazının oluşması sonucu malzemenin korozyon dayanımı azalmıştır.



Şekil 9. Numunelerin Tafel eğrileri

Tablo 3. Potansiyodinamik polarizasyon sonuçları

Numune	E_{corr} (V)	$I_{corr} \times 10^{-8}$ (A/cm ²)	$R_{px} 10^5$ (Ohm)	Korozyon hızı (mm/yıl)
İşlemsiz	-0.1424	2.008	6.614	0.0002252
Suda soğutulmuş	-0.1647	2.271	6.578	0.0002556
Fırında soğutulmuş	-0.1553	5.935	2.366	0.0006669

4 Sonuçlar

Çalışmada 1.4462 (AISI 2205) dubleks paslanmaz çelik numunelerine yüksek sıcaklıkta ısıtılma işlemi uygulanmış ve soğuma koşullarına bağlı olarak oluşan fazlar ve bunların mikroyapı, sertlik ve korozyon dayanımına etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre;

- İşlem görmemiş numunede ferrit ve östenit fazları hemen hemen eşit miktarda bulunmaktadır. Genel olarak ısıtılma işlemi görmemiş numunenin korozyon dayanımı yüksektir.
- 1200°C/30 dakika çözelti tavlama uygulanmış malzeme suda (hızlı) soğutulduğunda mikroyapının ferrit (yüksek oranda) ve östenitten oluştuğu görülmüştür. Bu numunede ferrit fazının baskın olmasında ötürü sertlik yüksek çıkmaktadır.
- 1200°C/30 dakika çözelti tavlama uygulanmış malzeme fırında (dengeli) soğutulduğunda ise ferrit fazı parçalanarak östenit ve tane sınırlarında ise ikincil fazlara (sigma) dönüşmektedir. Ferrit fazının azalması sonucu sertlik azalmıştır. Her ne kadar sigma fazı sert bir faz olsa da çok az miktarda oluştuğu için sertlik üzerine baskın bir etkisi olmamıştır. Fırında soğutulmuş numunede tane sınırlarında oluşan sigma fazı korozyon dayanımını azaltmıştır.
- Yüksek sıcaklıklardaki ısıtılma işlemlerinden sonra sigma fazının oluşumundan kaçınmak için malzeme hızlı (suda) soğutulmalıdır.
- Fırında soğutulan numunelerde tane sınırında sigma fazı oluşmuştur. Dubleks paslanmaz çeliklerde östenit fazı korozyon direnci sağlamaktadır, fakat bu durum

sigma fazının oluşmadığı durumlarda geçerlidir. Tane sınırlarına yerleşen intermetalik sigma fazı, fırında soğutulmuş numunede östenit fazı fazla olmasına rağmen, numunedeki çözünmeyi hızlandırmış ve daha düşük bir korozyon dayanımına neden olmuştur. Sigma fazı oluştuğu zaman östenit fazının sağladığı korozyon direnci etkisini baskılamakta ve malzemenin korozyon dayanımını düşürmektedir. Bu nedenle, DSS malzemelerde sigma fazının oluşumundan kaçınmak gereklidir.

Teşekkür

Yazar değerli katkılarından dolayı Doç. Dr. Alptekin Kısasöz ve Gülizar Songül Yalçınar e teşekkürlerini sunar.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 13

Kaynaklar

- [1] R. Yılmaz, and Z. Barlas, Paslanmaz çeliklerin gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde koruyucu gaz kompozisyonunun mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 11 (3), 391-400, 2005.
- [2] J. L. A. Arzola, M. A. G. Renteria, V. L. C. Hernandez, J. G. Guerra, V. H. M. Landeros, L. A. F. Franco, and F. F. C. Lopez, Study of the effect of sigma phase precipitation on the sliding wear and corrosion behaviour of duplex stainless steel AISI 2205. Wear, 400 (401), 43-45, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.019>.
- [3] L. Karlsson, Welding duplex stainless steels-A review of current recommendations. Weld World, 56, 65-76, 2012. <https://doi.org/10.1007/BF03321351>
- [4] A. Mavi, and G. Uzun, Dubleks 1.4462 paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesme parametrelerinin işlenebilirlik üzerine etkisi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5 (3), 177-184, 2017. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujs/issue/31140/293145>
- [5] Welds in the duplex stainless steel. <https://imt.uoradea.ro/auo.fmte/files-2010-v1/TCM/Ciofu%20Florin%20L1.pdf>, Accessed: 29 November 2020.
- [6] A. Kısasöz, Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında ısıtılma girdilerin modellenmesi ve deneysel verilerin eldesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Türkiye, 2015.
- [7] K. W. Chan, and S. C. Tjong, Effect of Secondary phase precipitation on the corrosion behaviour of duplex stainless steel. Materials, 7, 5268-5304, 2014. <https://doi.org/10.3390/ma7075268>
- [8] I. Calliari, K. Brunelli, M. Dabala, E. Ramous, Measuring secondary phases in duplex stainless steels. JOM, 61 (1), 80-83, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11837-009-0016-8>
- [9] A. B. Yiğit, ve A. Kurt, Dubleks paslanmaz çeliklerde sigma fazının korozyon dayanımına etkileri. International Journal of Engineering Research and

- Development, 7(4), 2-7, 2015. <https://doi.org/10.29137/umagd.379776>
- [10] A. Kısasöz, G. Özer, and A. Karaaslan, Effect of secondary phases on 475 degrees embrittlement of 1.4462 and 1.4501 duplex stainless steels at short-term heat treatment conditions. *Materials Research Express*, 6(11), 1-11, 2019. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4b38>
- [11] G. Yalçın, G. Özer, A. Kısasöz, and A. Karaaslan, Influence of the phase balance and cooling conditions on the microstructure and corrosion behaviour of solution-treated 1.4462 duplex stainless steel. *Materials Research Express*, 6(12), 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6f3a>
- [12] S. N. Patankar, and M. J. Tan, Sigma phase precipitation during superplastic forming of duplex stainless steel. *Materials at High Temperature*, 18, 41-44, 2002. <https://doi.org/10.1179/mht.2002.19.1.006>
- [13] Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels. Accessed 30 November 2020.
- [14] R. Magnabosco, Kinetics of sigma phase formation in a duplex stainless steel. *Materials Research*, 12(3), 321-327, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392009000300012>.
- [15] U. Sönmez, N. Çavuşoğlu, ve V. Ceyhun, Orbital tig kaynak yöntemiyle kaynak edilmiş dubleks paslanmaz çeliklerin mekanik, metalürjik ve korozyon özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 133-141, 2016.
- [16] H. E. Emre, R. Kaçar, A. Bülbül, ve B. Manisalı, AISI 316L-AISI 2205 farklı paslanmaz çelik çiftinin kaynak kabiliyeti. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 244-256, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.298178>
- [17] J. Nachazel, P. Martinek, P. Podany, and I. Polakova, Effect of heat treatment on the microstructure of duplex stainless steel. *Applied Mechanics and Materials*, 751, 9-14, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.751.9>
- [18] S. Toros, Effect of anisotropy determination methods on forming limit curve prediction of 304L stainless steel, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 244-256, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.342073>
- [19] H. Sieurin and R. Sandström, Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205. *Materials Science and Engineering A*, 444, 271-276, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.107>.
- [20] J. Y. Maetz, S. Cazottes, C. Verdu, X. Kleber, Precipitation and phase transformations in 2101 lean duplex stainless steel during isothermal aging. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47A, 239-253, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3215-7>.
- [21] I. Calliari, E. Ramous, P. Bassani, Phase transformation in duplex stainless steels after isothermal treatments continuous cooling and cold working. *Materials Science Forum*, 638 (642), 2986-2991, 2010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.2986>

