



Ceyhun Köse

Gaziosmanpaşa University, ceyhunia@gmail.com, Tokat-Turkey

Ramazan Kaçar

Karabük University, rkacar@karabuk.edu.tr, Karabük-Turkey

<http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2016.11.4.2A0100>

LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN AISI 2205 DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİĞİN MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Bu çalışmada, AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik levhalar CO₂ lazer ışını kaynak yöntemiyle %50 Ar + %50 He gaz korumalı ortamda, 4000W lazer gücüyle ve 90cm/dk kaynak hızıyla birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için çekme ve çentik darbe testleri uygulanmıştır. Kaynaklı bağlantının sertlik ölçümü kaynak yönüne dik kesitten gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı karakteristikleri ise Optik mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) ve XRD vasıtasıyla incelenmiştir. Sonuç olarak, CO₂ lazer kaynak yöntemi ile birleştirilen dubleks paslanmaz çelik kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) düşük ısı girdisine bağlı yüksek soğuma oranından etkilenecek final yapısının ferrit lehine değiştiği tespit edilmiştir. Kaynaklı birleştirmenin mekanik özellikleri kabul edilebilir değerlerde bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Paslanmaz Çelik, AISI 2205, CO₂ Lazer Kaynağı, Mekanik Özellikler, Mikroyapı

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF LASER BEAM WELDED AISI 2205 DUPLEX STAINLESS STEEL

ABSTRACT

In this study, AISI 2205 duplex stainless steel plates were joined with CO₂ Laser Beam Welding (LBW) method. The welding process were carried out in 50% Ar+50% He shielding gas atmosphere by using 4000W laser power for 90 cm/min welding speed. In order to determine the mechanical properties of laser welded joints, the tensile and charpy impact tests were applied. The hardness of the welded sample was measured on the cross section. The microstructure characterization of welded sample was carried out using with optical microscope, scanning electron microscope (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and XRD analysis. As a result of this study, the final microstructure of weld metal and heat affected zone (HAZ) were significantly affected on the favour of ferrite phase due to low heat input that caused high cooling rate in the solidification of CO₂ laser welded duplex stainless steel. The mechanical properties of welded sample were found acceptable.

Keywords: Stainless Steel, AISI 2205, CO₂ Laser Beam Welding, Mechanical Properties, Microstructure



1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Östenitik paslanmaz çeliklere iyi bir alternatif olan dubleks paslanmaz çeliklerin iç yapısının eşit oranda ferrit ve östenit fazlarından oluşması sayesinde iyi mekanik ve korozyon özellikleri göstermektedir [1 ve 2]. Dubleks mikroyapı; çeliği özellikle gerilmeli çatlak korozyonuna, tanelerarası ve çukurcuk korozyonuna iyi derecede dirençli hale getirmektedir. Bu çelikler üstün korozyon dirençleri sebebiyle, buhar kazanlarında, kimyasal tanklarda, ısı eşanjör borularında, kimya ve petrokimya endüstrisinde geniş bir alanda kullanılmaktadır [1 ve 6]. Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti yüksektir ve birçok ergitmeli kaynak yöntemleriyle birleştirilebilirler [7]. Ancak, dubleks paslanmaz çeliklerin lazer kaynaklı birleştirmeleri önem arz eder ve iddialı bir süreçtir. Lazer kaynak sistemi genel olarak ikiye ayrılır; 1- Katı hal lazer sistemleri (Nd: YAG Laser, Fiber Laser) 2- Gaz lazer sistemleri (CO₂ laser).

CO₂ Lazeri; yüksek ve devamlı güç (50 kW'a kadar) elde edilebilen bir lazer sistemidir. Diğer sistemlere göre verimi en yüksek olan sistemdir [8 ve 9]. Geleneksel CO₂ lazer kaynak yöntemi daha uzun dalga boyuna ve daha zayıf ışık emilimine sahip olması sebebiyle kondüksiyon (iletim) kaynağı olarak kullanılamaz. Yalnızca anahtar deliği (key hole) kaynağı olarak kullanılabilir. Daima düşük ısı girdisine ve yüksek soğuma oranına sahip anahtar deliği kaynak yöntemi yüksek yoğunlaşma enerjisi, yüksek kaynak hızı, dar kaynak bölgesi, derin nüfuziyet, otomasyona uygunluğu, yüksek mekanik dayanım, düşük distorsiyon ve ilave tel kullanmadan kaynak yapabilme imkânı sağlamaktadır [10-18]. Ancak, dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağının lazer kaynak yönteminde olduğu gibi hızlı soğuması problem oluşturabilir. Hızlı soğuma kaynaklı birleştirmede istenilen yapısal değişikliğin oluşmasına zaman tanımayarak yapıda istenilmeyen değişikliklerin oluşmasına neden olur.

Kaynaklı birleştirmelerde, kaynak bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) servis şartlarında maruz kalınan gerilmeler nedeniyle çekmeye ve eğilmeye zorlanabilirler. İlaveten kaynak sırasında oluşan kalıcı iç gerilmelerin etkisi de servis şartlarında göz önünde bulundurulmalıdır. Temelde statik yük altında paslanmaz çelik gibi sünek malzemelerin kaynak bölgesinde çatlak yayılımı gerçekleşemez. Fakat statik yük altındaki malzemede kalıntı gerilmeler, eğilme momentleri, termal gradyanlar ya da keskin yüzey hataları nedeniyle ortaya çıkan bölgesel gerinimler bu tür malzemelerde küçük çatlak oluşumlarına neden olabileceği göz ardı edilmemelidir [19]. Bu küçük çatlak oluşumlarının ise birleştirmelerin gerilmeli korozyon çatlak oluşumunu tetikleyebilir. Bu çalışmada, CO₂ lazer ışın kaynak yöntemiyle birleştirilen AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik kaynaklı bağlantılarının tek yönlü statik gerilme etkisi altındaki davranışları mekanik özellik ve mikroyapı incelemeleriyle etraflıca araştırılması amaçlanmıştır.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bu çalışmada, lazer kaynağıyla birleştirilen AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin mekanik ve metalurjik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, mekanik dayanımı yüksek lazer kaynaklı dubleks paslanmaz çelik kaynaklı birleştirmeler elde edilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik kullanılmıştır.

Tablo 1. AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

(Table 1. Chemical composition of AISI 2205 duplex stainless steel wt%)

%C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0.028	0.333	1.814	0.011	0.0072	22.88	3.105	5.450	0.019	0.119
Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Zn	N	Fe
0.224	0.036	0.0089	0.116	0.050	0.0038	0.012	0.034	0.058	65.68

AISI 2205 çelik levhalar, 4000W lazer gücünde, 200mm odak mesafesinde, dakikada 10 litre gaz debisiyle %50 Ar + %50 He gaz koruması altında, 90 cm/dk. kaynak ilerleme hızında, 0.266 kJ/mm ısı girdisiyle, 4 kW gücüne sahip TRUMPF LASERCELL 1005 marka CO₂ lazer kaynak makinesiyle yatay pozisyonda, önceden hazırlanmış bağlantı kalıbına tutturularak alın alına ilave metal kullanılmadan birleştirilmiştir. Birleştirmelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için kaynaklı çekme testi numuneleri ISO 4136: 2012, kaynaklı çekme testi numuneleri ISO 6892-1: 2009, çentik darbe testi numuneleri ISO 9016: 2012 standartlarında hazırlanmıştır. Deney numunelerinin kesit kalınlıkları 3 mm'ye indirilmiş ve böylece underfill (kaynak dikişinde çöküntü) oluşumları yok edilmiştir. Her bir şart için 3 numune hazırlanmıştır. Çekme deneyi, SHIMADZU AG-IS marka 100 kN kapasiteli çekme test cihazında 5 mm/dk ilerleme hızında, darbe çentik testi ise standart altı hazırlanan numunelere oda sıcaklığında OHR&FEDERAF AG PSW 13/15 marka deney cihazıyla gerçekleştirilmiştir.

Sertlik dağılımı ise elektrolitik dağlanan (10g oksalik asit + 100 ml saf H₂O) numune üzerinde SHIMADZU marka ölçüm cihazında batıcı uca 200g yük uygulanarak ölçülmüştür. Mikroyapı incelemeleri 5X-100X büyütme OLYMPUS marka optik mikroskop, JEOL JSM 6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve (EDS) donanımı ile gerçekleştirilmiştir. NIKON SMZ800 marka stereomikroskop vasıtasıyla makroyapı incelemeleri yapılmıştır. XRD analizi 40 kV gerilim ve 40 mA akım değerlerinde, Cu K α radyasyon ışınımı kullanılarak 2 $^{\circ}$ /dk. tarama hızı ile Rigaku DMAX-2200/PC marka cihazdan yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Birleştirmelerin radyografik muayenesi ise 90 kV, 30 mA enerji ile 45 sn pozlama süresinde, film kaynak uzaklığı ffd:1000 mm olacak şekilde X ışınları uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

4.1. Tahribatsız Radyografik Muayene Testi (Non-Destructive Radiographic Testing)

Birleştirmelerde süreksizlik oluşup oluşmadığını kontrol etmek amacıyla, kaynaklı deney numuneleri üzerinde radyografik muayene işlemi uygulanmış sonuç Şekil 1'de gösterilmiştir.

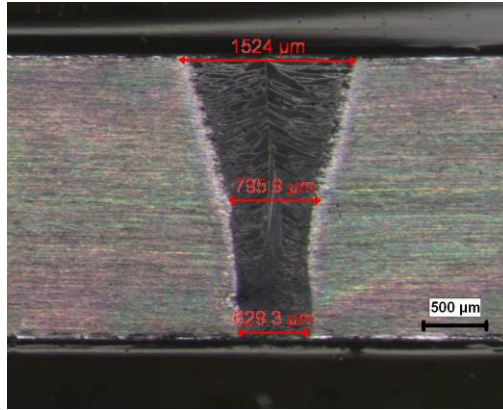


Şekil 1. Radyografik muayene test numunesi
(Figure 1. Radiographic image of laser welded sample)

Kaynaklı numunenin ana malzeme, ITAB ve kaynak metalinde herhangi bir hataya (malzeme üretimi esnasında oluşan hatalar, kaynak işlemi sonucunda kaynak dikişinde meydana gelen gaz boşlukları, çatlaklar vb.) rastlanmamıştır. Bu sonuç AISI 2205 paslanmaz çeliğin hatasız ve başarılı bir şekilde birleştirildiğine işaret etmektedir.

4.2. Makroyapı İncelemesi (Macrostructural Examinations)

Lazer kaynak yöntemiyle birleştirilen çeliğin kaynak dikiş profili Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, lazer kaynaklı birleştirmede yüksek nüfuziyet/genişlik oranının yanısıra diğer ergitme kaynaklı birleştirmelerle kıyaslandığında daha dar bir ITAB elde edilmesi kaynak yöntemiyle ilişkilidir. Çünkü CO₂ lazer ışını sürekli dalgalı mod ile yüksek enerji yoğunluğuna ve düşük ısı girdisine sahip bir yöntemdir [20].

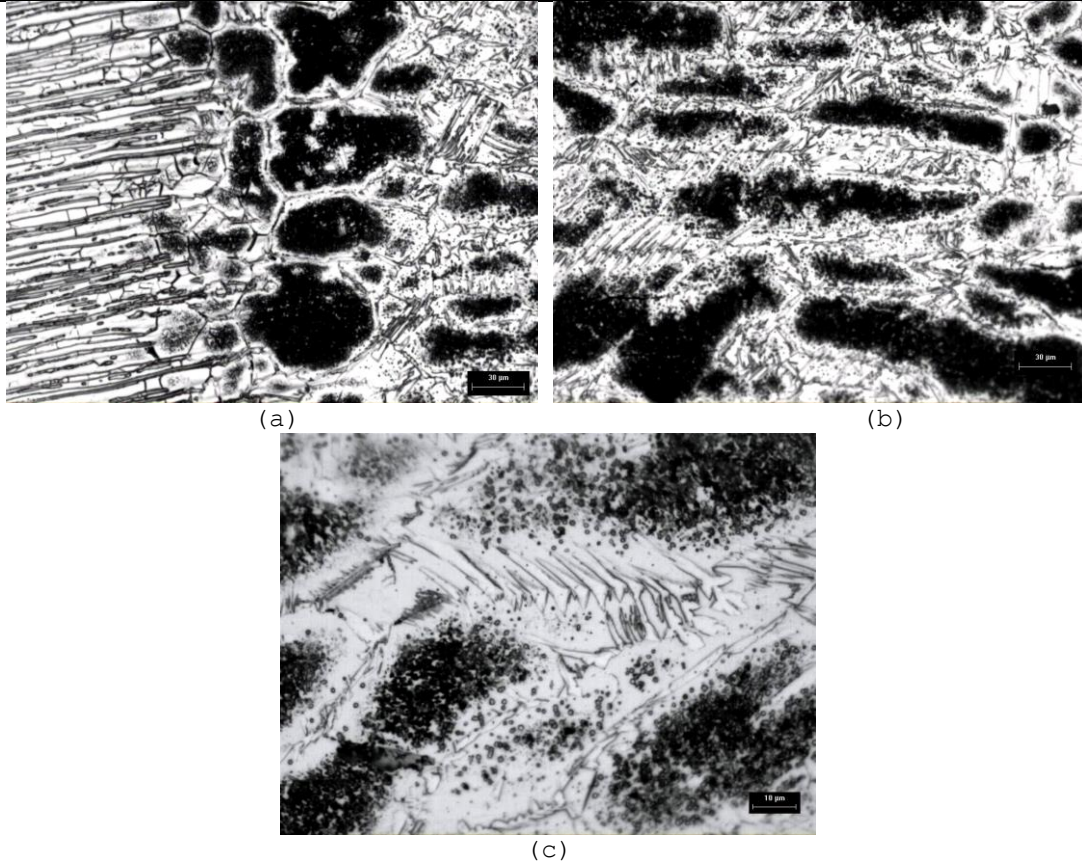


Şekil 2. Lazer kaynaklı AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik kaynak dikiş profili

(Figure 2. Weld bead profile of the laser welded joint)

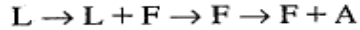
4.3. Mikroyapı İncelemeleri (Microstructural Examinations)

Çalışmada, kaynaklı birleştirmenin mikroyapı incelemesi yapılmış ve Şekil 3'de mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 3'den görüldüğü gibi temin edildiği şekliyle, AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin yapısı optimum özelliklerini sergilediği yaklaşık %50 ferrit %50 östenit fazlarından oluşmaktadır (Şekil 3(a)). Yapıdaki açık renkli görülen taneler östenit fazını ve koyu renkli görülen taneler ise ferrit fazını belirtmektedir. Çalışmada kaynak termal çevriminden etkilenecek ana malzeme üzerinde oluşan ITAB'ın dar bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Lazer kaynak yönteminin karakteristik özelliği olan düşük ısı girdisine bağlı olarak hızlı soğuma neticesinde çok dar bir ITAB oluşması beklenen bir durumdur. Dar bir ITAB oluşumu kaynaklı birleştirmenin ani bir kuvvet etkisi altında kaldığında tokluğunun iyi, dolayısıyla şekil alma kabiliyetinin de iyi olacağı anlamına gelir [21]. Lazer kaynaklı birleştirmenin düşük ısı girdisine bağlı olarak ITAB'da ulaşılan sıcaklık göz önünde bulundurulduğunda ferrit-östenit dengesi ferrit tanelerin kabalaşmasıyla ferrit lehine sapma göstererek kaba ferrit tanelerinden oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple ITAB sertliği ana malzemeden daha yüksek, fakat kaynak metalinden bir miktar düşük bulunması beklenir. Bilindiği üzere dubleks paslanmaz çeliklerin yüksek mukavemeti ve gerilmeli korozyon direnci yapısındaki delta ferrit fazından, tokluğu ve genel korozyon direnci ise yapısındaki östenit fazından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. Kaynaklı birleştirmenin mikroyapı görüntüleri, (a) ITAB (200X), (b) Kaynak metali (200X), (c) Kaynak metali (500X)
(Figure 3. Microstructure images of laser welded joint, (HAZ 200X) (b) Weld metal (200X) and (c) Weld metal (500X)

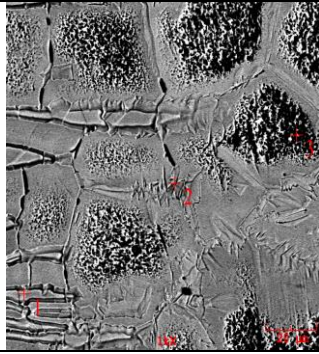
Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinde, özellikle kaynak metalinde ferrit-östenit faz dağılımı olarak 50/50 oranı elde edilmek istenilmektedir. Çünkü bu oranda en iyi mekanik, mikroyapı ve korozyon özellikleri elde edildiği bilinmektedir [22]. Ancak kaynaklı birleştirmeler veya ısıl işlemler neticesinde bu faz oranı değişir. Örneğin dubleks paslanmaz çeliklerin tümünde katılaşma süreci sıvıdan ferrit fazıyla başlar ancak, ferrit solvus sıcaklığı altında östenit dönüşümü meydana gelir. Dubleks paslanmaz çeliklerde dönüşüm sırasıyla aşağıdaki gibi özetlenebilir:



Östenit tanelerinin ilk oluşumu, ferrit tane sınırlarında çekirdeklenme ve büyüme süreciyle gelişir ve bu şekilde dönüşüm tamamlanır. Bunun yanında östenitin oluşumu östenit tane sınırlarında Widmanstätten kenar plakaları şeklinde ya da ferrit taneleri içerisinde taneler arası olarak da meydana gelebilmektedir. Ancak, kaynak metali mikroyapısı üzerinde kimyasal bileşimin yanısıra soğuma oranının etkisi büyüktür. Yüksek soğuma oranında kaynak metalinde ferritik olarak başlayan katılaşma oda sıcaklığına doğru soğuma sürecinde ferrit tane sınırlarından ve tane içlerinden çekirdeklenmeyle östenite dönüşmesi beklenir. Difüzyon kontrollü süreç ile meydana gelmesi beklenen ferrit-östenit dönüşümü için yeterli zaman olmaması sebebiyle yapının geneli ferrit fazından oluşurken, ferrit tane sınırlarında östenit tanelerinin oluştuğu görülmektedir. İlave olarak delta ferrit tanelerinin azot çözübilirlilik limiti artan sıcaklıkla arttığı için hızlı soğumadan dolayı tamamlanamayan ferrit-

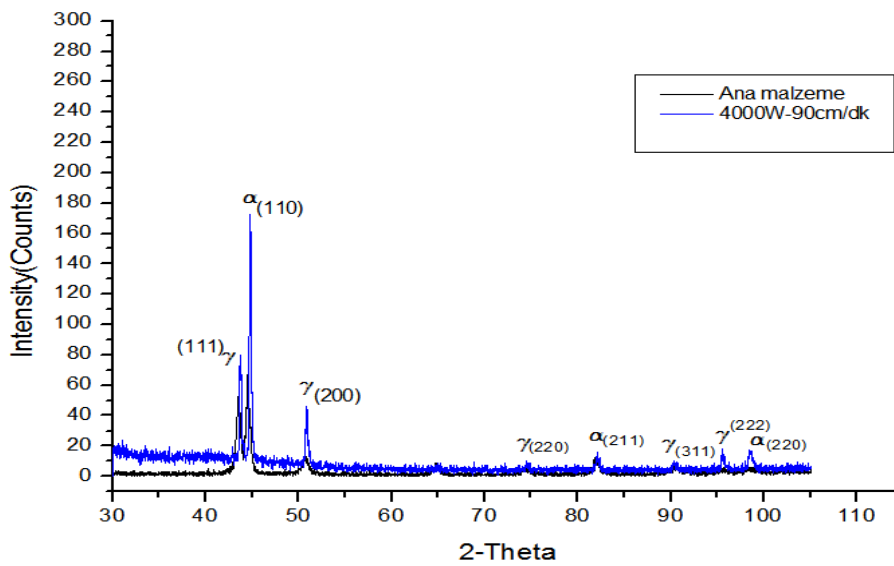
östenit dönüşümü sebebiyle yapıdaki azot krom ile kromnitrür oluşturarak hassaslaşmaya neden olacağı düşünülmektedir. Yapıdaki yüksek orandaki delta ferrit ve kromnitrür kaynak metalinin sertliğinin ana malzemeye oranla daha yüksek bulunmasına sebep olurken korozyon direncinde azalmaya neden olacağı düşünülmektedir. Lazer kaynaklı numunenin SEM incelemeleri yapılmış; ana malzeme, kaynak metali ve ITAB'dan noktasal EDS analizi alınmıştır. Sonuçlar Şekil 4'de gösterilmiştir.

Kaynak Parametresi		Element (% ağırlık)			
4000W-90cm/dk		Cr	Ni	Mo	Fe
Noktasal Ölçüm	1.Nokta	21.364	5.575	2.449	63.114
	2.Nokta	20.573	5.074	3.009	59.471
	3.Nokta	24.068	4.066	1.834	68.458



Şekil 4. Numunenin EDS analiz sonuçları
(Figure 4. EDS analysis from laser welded joint, showing the location of chemical analysis)

Kaynak metalinin 3 nolu EDS nokta analizi sonucu çeliğin kimyasal bileşim sonucuyla kıyaslandığında daha fazla krom daha az molibden ihtiva etmektedir. Bu durum yüksek soğuma hızına bağlı olarak östenit dönüşümü tamamlanamadığı için yapıdaki kromun azot ile reaksiyona girerek kromnitrür oluşturmasına atfedilebilir. Bu kromnitrürler kaynak metalinin sertliğini ve dolayısıyla dayanımı arttırdığı için çekme deneyinde kopmanın ana malzemeden meydana gelmesine neden olduğu düşünülmektedir. Fakat bu bölgedeki krom azalması birleştirmenin korozyon direncinde zayıflama meydana getirmesi beklenir. Kaynaklı deney numunesi XRD yöntemi ile $30^\circ < 2\theta < 105^\circ$ aralığında incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 5'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

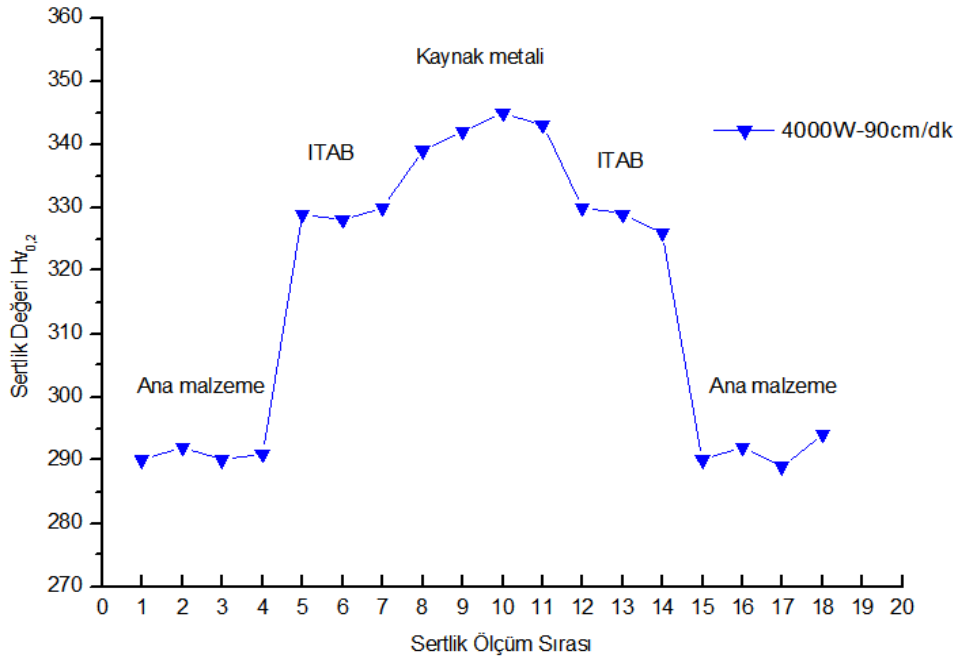


Şekil 5. XRD analizi sonucu
(Figure 5. XRD analysis result)

Ana malzemeye ait XRD grafiği ile lazer kaynaklı numunenin grafiği karşılaştırıldığında, kaynaklı numune piklerinin daha keskin ve sık olduğu, ayrıca pik şiddetlerinin daha yüksek olması kaynak termal çevrim etkisiyle numunenin kristal kafes parametresinde oluşan değişikliklerle ilgili olduğu söylenebilir. XRD grafiklerinde ITAB ve kaynak metalinde ikincil faz çökeltileri, intermetalik sigma (σ), chi (χ) fazı, krom-karbür çökeltmesi ($M_{23}C_6$), (M_7C_3) ve krom nitrür gibi oluşumlar tespit edilmemiştir. Düşük ısı girdisine bağlı olarak hızlı soğuma neticesinde yeterli zaman olmadığı için ikincil faz oluşumların meydana gelmesi beklenemez. Ancak ulaşılan sıcaklık düşünüldüğünde ferrit-östenit dönüşümü için zaman olmamasına rağmen artan sıcaklıkta çözünebilirliği artan azotun bu sıcaklıkta krom ile reaksiyona girerek krom nitrür oluşturması beklenilir. Fakat XRD analiziyle az miktarlarda oluşan ikincil faz oluşumlarının tespit edilememesi göz ardı edilmemelidir.

4.4. Birleştirmenin Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Laser Welded Joint)

Tek yönlü statik kuvvet etkisi altında kalan lazer kaynaklı deney numunesinin göstereceği davranışsal değişiklik çekme deneyi ile, kaynaklı numunelerin ani kuvvet etkisi altında darbe dayanımları çentik darbe deneyi ile belirlenmiştir. İlave olarak kaynaklı deney numunesinin sertlik dağılımı belirlenmiştir (Şekil 6). Çekme deneyi sonucunda kaynaklı birleştirmenin ortalama akma dayanımı 708 MPa, ortalama çekme dayanımı ise 791 MPa ve % kopma uzaması %32 olarak bulunmuştur. Deney numuneleri test sonucunda ana malzeme tarafından kopmuştur. Kopmanın ana malzeme üzerinden gerçekleşmesi numunelerin kaynak edilebilirlik açısından kabul edilebilir değerlere sahip olduğunu gösterir. Kaynaklı deney numunelerinin oda sıcaklığındaki tokluklarının belirlenebilmesi için gerçekleştirilen darbe çentik deneyleri sonucunda ortalama darbe dayanımları 168 J/cm² olarak belirlenmiştir.



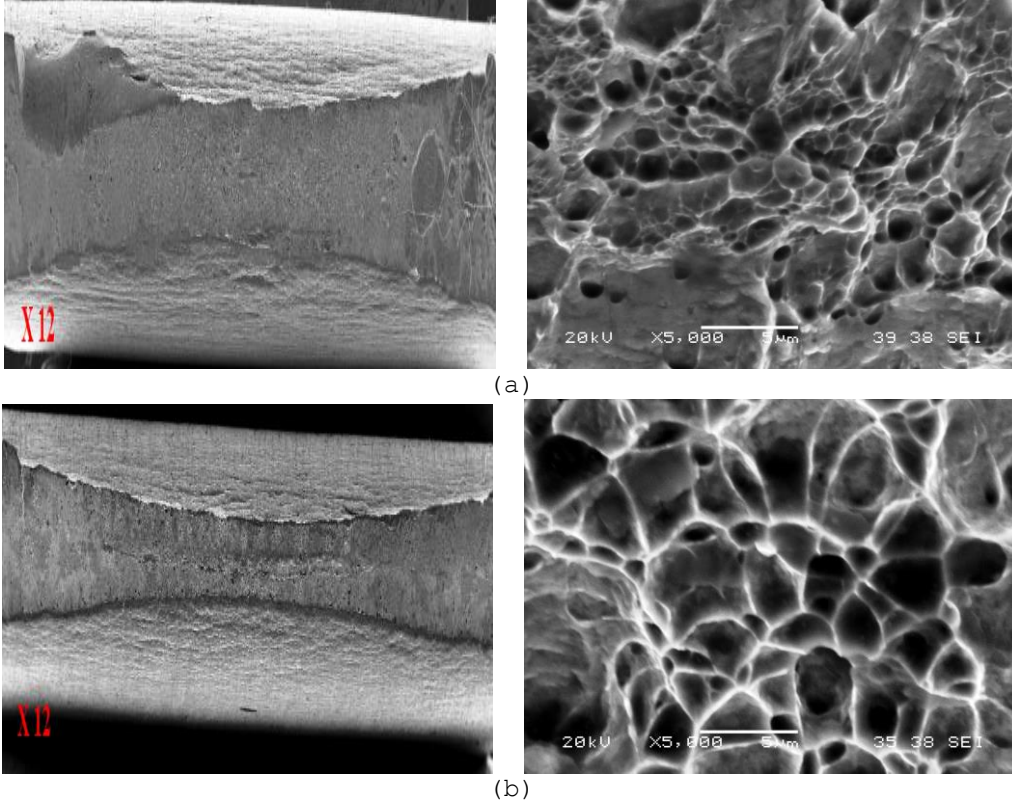
Şekil 6. Numunenin sertlik profili
(Figure 6. Microhardness distributions in the welded joint)



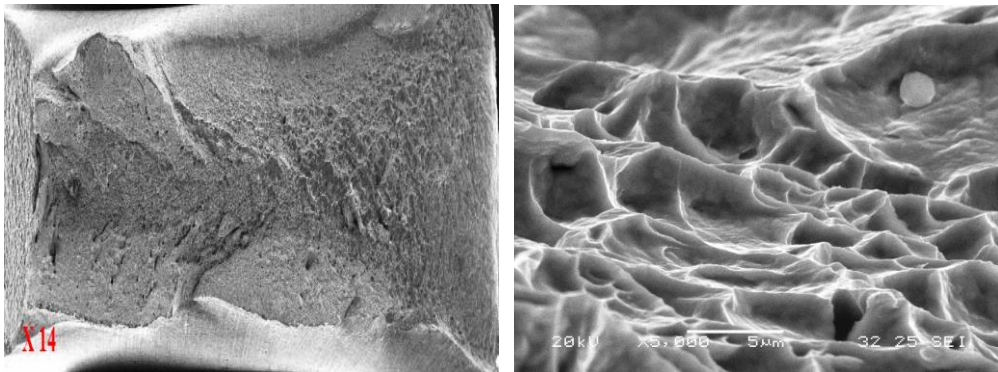
Şekil 6'dan görüldüğü gibi kaynaklı numunenin en yüksek sertliği kaynak metalinde daha sonra ITAB ve en düşük ise ana malzemede ölçülmüştür. ITAB sertliği ise kaynak metalinin sertliğine oldukça yakın bulunmuştur. Birleştirmenin kaynak metali sertliğinin; ITAB ve ana malzemeye göre daha yüksek bulunmasının sebebi düşük ısı girdisine bağlı olarak kaynak sonrası hızlı soğuma neticesinde elde edilen ince taneli kaynak metali mikroyapısıyla ve ferrit lehine değişen ferrit-östenit dengesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ferrit lehine dönüşüm sebebiyle ITAB'nin ana malzemeye göre daha yüksek sertliğe, ulaşılan sıcaklık göz önünde bulundurulduğunda kabalaşan ferrit taneleri sebebiyle kaynak metaline göre daha düşük sertliğe sahip olduğu düşünülmektedir. Bulgular, kaynak yöntemine bağlı olarak kaynak sonrası dubleks paslanmaz çeliğin kaynak metalinin hızlı soğumaya bağlı olarak ferrit-östenit dönüşümü difüzyon kontrollü süreç olduğu için kısa zaman diliminde tamamlanamadığına işaret etmektedir. Kaynak metalinin yapısının ferrit lehine dönüşmesi birleştirmenin dayanımının kabul edilebilir değerlerde sertliğin ise ana malzemeye göre yüksek bulunmasına neden olmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi dubleks paslanmaz çeliklerin dayanımı ve gerilmeli korozyon direnci ferrit, korozyon direnci ve tokluğu ise östenit fazından gelir [23].

Benzer bir çalışmada Badji, akma dayanımı ve çekme dayanımı üzerinde ergime bölgesinin ferrit-östenit oranının etkili olduğunu bildirmiştir [24]. Ancak, yapının yüksek oranda delta ferrit fazından oluşması ve azot çözübilirliğinin artan sıcaklıkla artması yüksek azot ihtiva eden delta ferrit fazı solvüs eğrisi altında östenit dönüşümünü tamamlayamayarak kimyasal içerikte fazlaca bulunan krom ile reaksiyona girerek kromnitür oluşturacağı literatürde bildirilmiştir. Bu bölgelerde krom azalması sebebiyle korozyon direncinde zayıflama beklenir. Bu sebeple dubleks paslanmaz çeliklerin lazer kaynaklı birleştirmelerinin korozyon dirençlerinin iyileştirilmesi için kaynak sonrası ısıl işleme tabi tutulması önerilir. Çalışmada çekme deney numunelerinin kırılma yüzeyleri incelenerek Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi numunelerin sünek kırılma davranışı sergileyerek kırıldığı ve kırılma yüzeylerinde meydana gelen çukurcuklarda ve çevresinde herhangi bir inklüzyon ve çatlak oluşum meydana gelmediği görülmektedir. Çentik darbe deneyi sonrası numunelerin kırılma yüzeyi görüntüleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde kırılma sünek biçimde gerçekleşmiştir. Numune yüzeyinde görülen çukurcuklar ve darbe çentik numunesinin kesit daralmasının fazla olması kırılma biçiminin sünek kırılma biçiminde gerçekleştiğinin en güzel göstergesidir.

Isıl işlemle sertleşmeyen lazer kaynaklı dubleks paslanmaz çelik sahip olduğu ferritik-östenitik yapısı ve yapıdaki oluşan delta ferrit miktarına bağlı olarak oda sıcaklığında ani kuvvete karşı tok bir davranış sergilemesi beklenen durumdur. Dubleks malzeme yapısının başlangıçtaki 50/50 ferrit-östenit faz oranının lazer kaynak işleminin etkisiyle ferrit lehine değişim göstermesiyle yüksek darbe dayanımı elde edilmiştir. Benzer bir çalışmada Mourad ve ark., düşük ısı girdisine bağlı olarak çok hızlı soğuma sonucunda ITAB'da uygun olmayan ferrit-östenit dağılımına dikkat çekerek aşırı derecede ferrit miktarının artması durumunda (%75'in üzerinde ferrit) dubleks paslanmaz çeliklerin darbe tokluklarının azalacağını özellikle vurgulamıştır [22]. Kaynak metali delta ferrit fazı içerisinde oluşması muhtemel krom nitür gibi sert ikincil faz parçacıkların kırılma başlangıcı oluşma ihtimali de göz ardı edilmemelidir.



Şekil 7. Çekme deney numunelerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri, (a) Ana malzeme, (b) Kaynak metali
(Figure 7. SEM image of the welded sample of fracture surface of the weld after the tensile test, (Base metal), (b) Weld metal)



Şekil 8. Çentik darbe deneyi numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri
(Figure 8. SEM image of the welded sample of fracture surface of the weld after the charpy impact test)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

CO₂ Lazer kaynak yöntemiyle birleştirilen AISI 2205 dupleks paslanmaz çeliğin statik yük etkisi altındaki davranışları araştırılmış ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Lazer kaynak yönteminin düşük ısı girdisi ve yüksek soğuma oranı kaynak metali mikroyapı ve morfolojisi üzerinde etkili olduğu bulunmuştur. Kaynak metali ve ITAB mikroyapısının ferrit-östenit dengesi, ferrit lehine ana malzemeden farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Düşük ısı girdisine bağlı olarak çok dar bir ITAB oluşmuştur. Ferrit-östenit dengesi ferrit lehine eğilim

gösteren ITAB'da ferrit tanelerinde kabalaşma oluşmuştur. Ayrıca yüksek soğuma hızından dolayı ferrit-östenit dönüşümü tamamlanmaya zaman bulunmadığından dolayı bu sıcaklıkta azot krom ile bileşik yaparak kromnitür oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir. Bu bölgelerde krom azalması sebebiyle korozyon direncinde zayıflama beklenir. Bu sebeple dubleks paslanmaz çeliklerin lazer kaynaklı birleştirmelerinin korozyon dirençlerinin iyileştirilmesi için kaynak sonrası ısıl işleme tabi tutulması önerilir.

- EDS analizi sonuçları kaynak metali kimyasal bileşiminde krom miktarının ana malzemeye göre daha yüksek bulunması hızlı soğumaya bağlı olarak ferrit östenit dönüşümü için yeterli zaman bulunmaması sebebiyle yüksek sıcaklıklarda azotun krom ile bileşik yaparak bu bölgelerde kromnitür oluştuğuna işaret etmektedir. Ancak XRD analizleri sonucunda ITAB ve kaynak metalinde ikincil faz oluşumuna rastlanılmamıştır. XRD yöntemiyle düşük oranda ikincil faz parçacıkların tespit edilememesi hesaba katılmalıdır.
- Yüksek soğuma hızının neden olduğu delta ferrit fazı artışı kaynaklı birleştirmenin çekme dayanımını ve sertliğinin artmasına sebep olarak çekme numunesinin ana malzemenin kopmasına neden olmuştur. Çekme testi neticesinde lazer kaynaklı numunelerin tamamı ana malzeme tarafından kopmuştur. Ayrılmanın ana malzeme tarafından meydana gelmesi dubleks paslanmaz çeliğin lazer kaynak kabiliyetinin kabul edilebilir olduğunun göstergesidir.
- Çekme deney numuneleri sünek kırılma davranışı sergileyerek kırılmıştır. Numunelerin kırılma yüzeylerinde meydana gelen çukurcuklarda ve çevresinde herhangi bir inklüzyon ve çatlak oluşumuna rastlanmamıştır.
- Oda sıcaklığında gerçekleştirilen darbe deneyi sonucunda, yüksek tokluk değeri elde edilmiştir, yüksek darbe dayanımına ana neden olarak ferrit lehine dönüşen ferrit-östenit faz yapısıyla ilgili bulunmuştur. Darbe deneyi numuneleri sünek kırılma davranışı sergileyerek kırılmıştır.
- Birleştirmenin kaynak metali sertliğinin; ITAB ve ana malzemeye göre daha yüksek bulunmasının nedeni kaynak sonrası hızlı soğuma neticesinde elde edilen ince taneli kaynak metali mikroyapısıyla ve ferrit lehine değişen ferrit-östenit dengesiyle alakalı olduğu düşünülmektedir.

NOT (NOTE)

Bu çalışma, 1-4 Eylül 2016 tarihleri arasında İstanbul-Büyükdada'da yapılan International Science Symposium (ISS2016)' da sözlü bildiri olarak sunulduktan sonra genişletilmiş ve yeniden yapılandırılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Karabük Üniversitesi BAP proje birimince desteklenmiştir, adı geçen birime teşekkür edilir. Ayrıca, numunelerin lazer kaynaklı birleştirmelerinin yapıldığı Formlaser firmasına, Karabük Üniversitesi araştırma görevlisi Dr. Hayriye Ertek Emre'ye, Marmara Üniversitesi değerli öğretim üyesi Hamit Özkan Gülsoy'a, Niğde Üniversitesi değerli öğretim üyesi Serkan Toros ve araştırma görevlilerine, Sakarya Üniversitesinden Uzman Fuat Kayış'a ve Yıldız Teknik Üniversitesinden Teknisyen Mehmet Çalışkan'a teşekkür edilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yang, S.M., Chen Y.C., Pani Y.T., and Lin, D.Y., (2016). Effect of Silver on Microstructure and Antibacterial Property of 2205 Duplex Stainless Steel, *Materials Science and Engineering: C*, Vol:63, 376-383.
2. Warren, A.D., Harniman, R.L., Guo, Z., Younes, C.M., Flewitt, P.E.J., and Scott, T.B., (2016). Quantification of Sigma-Phase Evolution in Thermally Aged 2205 Duplex Stainless Steel, *Journal of Materials Science*, Vol:51, 694-707.
3. Lippold, J.C. and Varol, I., (1997). Characterization of Weld Solidification Cracking in a Duplex Stainless Steel, *Materials Characterization*, Vol:39, 555-573.
4. Garcia, R.L., Portero, M.J., and Anton, J., (2010). Corrosion Behaviour of Sensitized and Usensitized Alloy 900 (UNS 1.4462) in Concentrated Aqueous Lithium Bromide Solutions and Different Temperatures, *Corrosion Science*, Vol:52, 950-959.
5. Karahan, T., Ertek Emre, H., Tümer, M., and Kaçar, R., (2014). Strengthening of AISI 2205 Duplex Stainless Steel by Strain Ageing, *Materials and Design*, Vol:55, 250-256.
6. Kısasöz, A. and Karaaslan, A., (2014). Finite Element Analysis of 2205 Duplex Stainless Steel Welds, *Materials Testing*, Vol:10, 795-799.
7. Odabaş, C., (2002). *Paslanmaz Çelikler, Temel Özellikleri, Kullanım Alanları, Kaynak Yöntemleri*, Askaynak, İstanbul.
8. Kou, S., (2003). *Welding Metallurgy*, Second Editon, A John Wiley & Sons, INC., Publication.
9. Singh, C.S., Zeng, H., Guo, C., and Cai, W., (2012). *Lasers: Fundamentals, Types and Operations, Nanomaterials: Processing and Characterization With Lasers*, First Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
10. Köse, C. and Kaçar, R., (2015). Effect of Welding Speed on The Mechanical Properties and Microstructure of Laser Welded AISI 316L Stainless Steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol:30, 225-235.
11. Köse, C. and Kaçar, R., (2014). Mechanical Properties of Laser Welded 2205 Duplex Stainless Steel", *Materials Testing*, Vol:56, 779-785.
12. Köse, C. and Kaçar, R., (2015). An Investigation of CO₂ Laser Beam Welding Method of AISI 420 Martensitic Stainless Steel, *Technological Applied Sciences*, Vol:10, 13-17.
13. Köse, C. and Kaçar, R., (2014). The Effect of Preheat & Post Weld Heat Treatment on the Laser Weldability of AISI 420 Martensitic Stainless Steel, *Materials and Design*, Vol:64, 221-226.
14. Köse, C., Kaçar, R., Zorba, A.P., Bağirova, M., and Allahverdiyev, A.M., (2016). The Effect of CO₂ Laser Beam Welded AISI 316L Austenitic Stainless Steel on the Viability of Fibroblast Cells, *In Vitro*, *Materials Science and Engineering: C*, Vol:60, 211-218.
15. Köse, C., and Kaçar, R., (2016). In Vitro Bioactivity and Corrosion Properties of Laser Beam Welded Medical Grade AISI 316L Stainless Steel in Simulated Body Fluid, *International Journal of Electrochemical Science*, Vol:11, 2762-2777.
16. Köse, C., (2016). An Investigation of the Surface Characterization of Laser Surface Remelted and Laser Beam Welded AISI 316L Stainless Steel, *International Journal of Electrochemical Science*, Vol:11, 3542-3554.



17. Taskin, M., Caligulu, U., and Turkmen, M., (2011). X-Ray Tests of AISI 430 and 304 Stainless Steels and AISI 1010 Low Carbon Steel Welded by CO₂ Laser Beam Welding, *MP-Materials Testing-Materials and Components Technology and Application*, Vol:53, 741-747.
18. Karaaslan, A., (2009). *Laser ile Malzeme İşlemleri*, Literaür Yayınları, İstanbul.
19. Shahinian, P., (1978). *Fatigue and Creep Crack Propagation in Stainless Steel Weld Metal*. Welding Research Supplement.
20. El-Batahgy, A., (1997). *Effect of Laser Welding Parameters on Fusion Zone Shape and Solidification Structure of Austenitic Stainless Steels*", *Materials Letters*, Vol:32, 155-163.
21. El-Batahgy, A., Khourshid, A., and Sharef, T., (2011). *Effect of Laser Beam Welding Parameters on Microstructure and Properties of Duplex Stainless Steel*, *Materials Sciences and Applications*, Vol:2, 1443-1451.
22. Mourad, H.I., Khourshid, A., and Sharef, T., (2012). *Gas Tungsten Arc and Laser Beam Welding Processes Effects on Duplex Stainless Steel 2205 Properties*, *Materials Science and Engineering A*, Vol:549, 105- 113.
23. Clark, C.A. and Guha, P., (1982). *Welding Characteristics of Duplex Steels*, *Duplex Stainless Steels*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 631-647.
24. Badji, R., Bouabdallah, M., and Bacroix, B., (2008). *Phase Transformation and Mechanical Behavior in Annealed 2205 Duplex Stainless Steel Welds*, *Materials Characterization*, Vol:59, 447-453.