

Tel Ark Eklemeli İmalat Yöntemiyle Paslanmaz Çelik Silindirik Parçanın Üretimi ve Karakterizasyonu

Fabrication and Characterization of a Stainless-Steel Cylindrical Part by Wire Arc Additive Manufacturing Method

Ercan Çağlar¹, Kürşat Uygur Altun¹, Yusuf Ayan², Nizamettin Kahraman¹

¹Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Karabük/Türkiye
²Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Karabük/Türkiye

Başvuru: 03/08/2023 **Kabul:** 20/08/2023 **Çevrimiçi Basım:** 08/12/2023

Öz

Tel ark eklemeli imalat (TAEİ) yönteminin kullanımı ve önemi son yıllarda giderek artmaktadır. Yöntemin avantajları bu ilerlemeyi destekleyen birer faktör olmuştur. Bu avantajlardan biri de piyasada bulunmayan veya standart olarak temin edilemeyen bir metal parçanın bu yöntemle üretilebilmesidir. Bu çalışmada örnek olarak TAEİ tekniği ile silindirik bir parça üretilmiştir. Nispeten orta büyüklükte olarak nitelendirilebilecek bu parçanın çapı yaklaşık 100 mm ve yüksekliği 120 mm'dir. Üretilen parçadan alınan numunelere makro yapı, çekme testi, eğme testi, mikroyapı ve mikrosertlik çalışmaları yapılmıştır. Makro yapı incelemelerinde parçada herhangi bir kusura rastlanmamıştır. Parçanın ortalama çekme dayanımı 548 MPa ve ortalama maksimum uzaması yaklaşık %39 olarak hesaplanmıştır. Mikroyapı çalışmalarında yapının ağırlıklı olarak östenit fazından oluştuğu, bununla birlikte δ ferrit fazını da içerdiği gözlemlenmiştir. Üretilen parçanın sertliği ortalama 212 HV olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler

eklemeli imalat, TAEİ, silindir, paslanmaz çelik, mekanik özellikler

Abstract

The use and importance of the wire arc additive manufacturing (WAAM) method has been increasing in recent years. The advantages of the method have been a factor supporting this proceed. One of these advantages is that a metal part, which is not available in the market or cannot be supplied as a standard, can be produced by the method. In this study, as an example, a cylindrical part was produced with the WAAM technique. This part, which can be described as relatively medium-sized, had a diameter of approximately 100 mm and a height of 120 mm. Macrostructure, tensile test, bending test, microstructure and microhardness studies were carried out with the samples taken from the produced part. No defects were found in the part during the macrostructure examinations. The mean tensile strength of the part was calculated as about 548MPa and mean the elongation was about 39%. In the microstructure studies, it was observed that the structure mainly consists of the austenite phase, but also contains the δ ferrite phase. The hardness of the manufactured part was measured as 212 HV on average.

Key Words

additive manufacturing, WAAM, cylinder, stainless steel, mechanical properties



*Sorumlu Yazar: Yusuf Ayan

Not: Bu çalışmanın özeti 6. Uluslararası Demir Çelik Sempozyumunda bildiri olarak sunulmuş ve Proceeding Book'ta yayınlanmıştır. JESRED'in bu sayısında ise tam metni yayınlanmıştır.

Bu makaleyi alıntılar için; Yusuf Ayan ve ark., Tel Ark., Eklemeli İmalat Yöntemiyle Paslanmaz Çelik Silindirik Parçanın Üretimi ve Karakterizasyonu, Journal of Steel Research and Development, 4(2), 24-32.

1. Giriş

Eklemeli imalat (Eİ), ham malzemenin katmanlar şeklinde birbiri üstüne biriktirilmesiyle parça oluşturma prensibine dayanan bir üretim tekniğidir. Eİ ile gerektiği kadar malzeme kullanılıp, bileşenler istenilen boyutlara tam ya da yakın olarak üç boyutlu olarak üretilebilmektedir. Eİ polimer, seramik, kompozit ve metal gibi farklı malzeme gruplarına uygulanabilir [1]. Endüstride yaygın olarak metal malzemeler kullanıldığından metalik parçaların Eİ yöntemiyle üretimi önemlidir. Metallerin Eİ işlemi için farklı üretim teknikleri bulunmaktadır. Seçici lazer ergitme, elektron ışını ile ergitme ve tel ark eklemeli imalat (TAEİ) bunlardan yaygın olarak bilinenidir [2]. Diğer yöntemlerle kıyaslandığında TAEİ yüksek malzeme kullanımı, yüksek üretim verimliliği ve düşük maliyet gibi avantajlara sahiptir. Bu nedenle TAEİ büyük ölçekli bileşenlerin üretimi için tercih edilebilir bir metottur [3]. TAEİ işleminde kaynak arkıyla metalik teller ergitilir ve bunların üst üste yığılmasıyla üretim yapılır [4]. Üretimde, TIG, plazma, gazaltı metal ark (GMAK) ve hatta tozaltı kaynak yöntemi kullanılabilir [5]. Bunların arasında GMAK yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir [6].

TAEİ ile birçok farklı malzeme türüne işlem yapılabilir. Düşük alaşımlı çelik [7], paslanmaz çelik [8], alüminyum alaşımı [9] ve titanyum alaşımı [10] gibi çeşitli malzemelerle yapılmış üretimler mevcuttur. TAEİ konusunda yapılan önceki çalışmalarda genel olarak üretilen yapının malzeme özellikleri karakterize edilmiş, üretim parametrelerinin etkisi incelenmiş, proses iyileştirmeleri yapılmış veya ihtiyaca yönelik fonksiyonel bileşenler üretilmiştir. Zhang vd. [11], TAEİ ile paslanmaz çelik tel kullanarak kafes şekilli piramit bir yapı üretmişler ve uyguladıkları mekanik testlerde çekme dayanımı ve uzama değerleri bakımından dövme standartlarını aşan sonuçlar elde etmişlerdir. Kumar ve Maji [12], 304L paslanmaz çelik ve Inconel 625 alaşımından oluşan iki metalli yapıyı TAEİ yöntemiyle üretmişler ve kullandıkları yöntemin fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeli bileşenlerde kullanıma potansiyelinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Belletti vd. [8], TAEİ ile 316LSi tel kullanarak yaklaşık 150 mm x 40 mm x 25 mm boyutlarında ürettikleri kalın duvarlı yapının mikro yapısını inceleyen bir çalışma yürütmüşlerdir. Rodrigues vd. [13], benzer şekilde 316LSi malzeme ile ürettikleri yapıya ısı işlem uygulamasının etkilerini inceleyen kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Bunlara ek olarak literatürde TAEİ ile silindirik malzeme üretimi konusunda gerçekleştirilmiş çalışmalar bulunmaktadır. Pramod vd. [9], TAEİ ürettikleri 145 mm çapında ve 11 mm yüksekliğinde bir alüminyum alaşımı malzemenin mekanik özelliklerini ve mikro yapısını incelemişlerdir. Nagasai vd. [14] TAEİ işleminde GMAK ve soğuk metal transfer (CMT) olmak üzere iki farklı kaynak yöntemi kullanmış, düşük alaşımlı çelikten silindirik parçalar üretmişlerdir. Üretilen bu parçaların mekanik özelliklerini ve kaynak yöntemi farklılığı nedeniyle değişen ısı girdisinin etkilerini kıyaslamalı olarak araştırmışlardır. Goviazin vd. [7] düşük alaşımlı çelik ve paslanmaz çelik malzemeden TAEİ yöntemi ile silindirik parçalar üretmiş ve bunların mekanik özelliklerini ve statik yük altındaki davranışlarını belirlemişlerdir. Nagasai vd. [15] 308L paslanmaz çelikten TAEİ ile ürettikleri silindirik parçanın mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir.

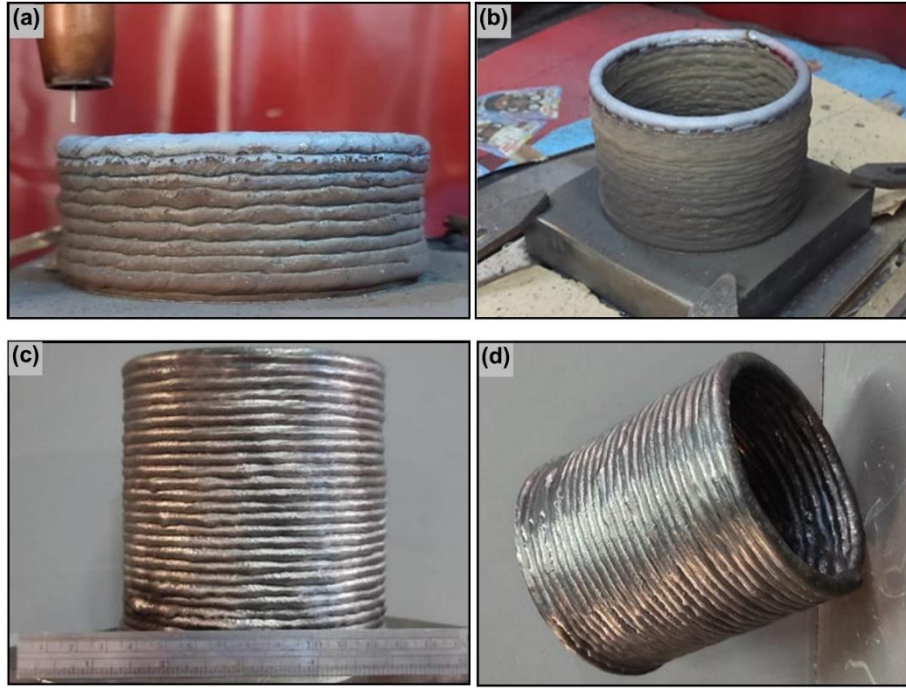
Literatür araştırmaları sonucunda TAEİ yöntemiyle ağırlıklı olarak duvar tipi üretimlerin yanı sıra, çeşitli malzemelerle silindirik parçaların üretildiği görülmüştür. Paslanmaz çeliklerin silindirik formda üretilmesi üzerine yapılmış çalışmalar ise sınırlıdır. Bu çalışmada TAEİ ile 316LSi paslanmaz çelik tel kullanılarak silindirik bir parça üretilmiş ve üretilen parçanın mekanik (çekme, eğme testi ve sertlik) ve makro/mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmayla düşük alaşımlı çeliğe göre nispeten daha maliyetli olan paslanmaz çelikten istenilen boyutlarda silindirik parça üretilebileceği ve son işlem uygulanarak üretilen parçanın endüstride kullanılabilirliği gösterilmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

Üretim işleminde 1.2 çapında 316LSi (C: 0.02, Mn: 1.90, Si: 0.70, Cr: 18.50, Ni: 11.50 ve Mo: 2.50) paslanmaz çelik tel ve 140 mm x 140 mm x 40 mm boyutlarında St37 malzemeli altlık kullanılmıştır. Koruyucu gaz olarak %98 Ar, %2 CO₂ karışım gazı kullanılmış, akış oranı 15 L/dk olarak ayarlanmıştır. Katmanlar arası geçiş sıcaklığı 80-90 °C olarak belirlenmiştir. Üretilen silindirik parça için birçok ön parametre çalışması yapılmış ve denemeler sonucunda Tablo 1'de verilen üretim parametreleri kullanılmıştır. Üretim işlemleri kartezyen üç eksenli hareket eden ve döner tablaya sahip olan makineyle yapılmıştır. Şekil 1'de üretim esnasında farklı zamanlarda ve üretim sonrası silindirik parçanın görüntüleri verilmiştir.

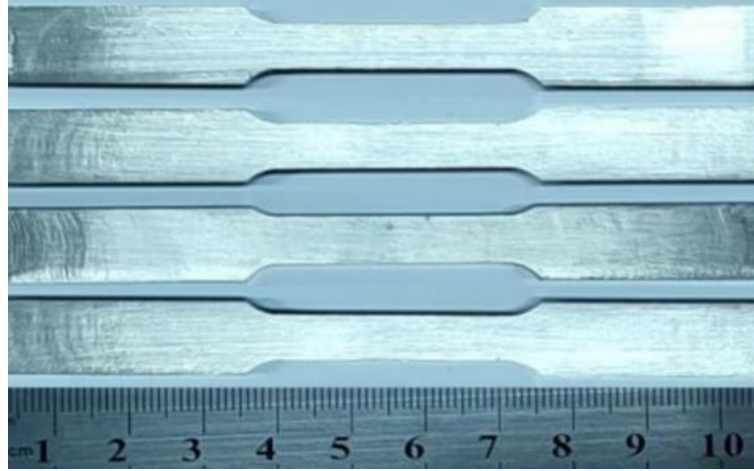
Tablo 1. Üretim parametreleri.

Akım (A)	Gerilim (V)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Tel Besleme Hızı (m/dk)
100-125	18-20	150	3



Şekil 1. TAEİ yöntemi ile üretilen silindirik parça.

TAEİ yöntemi ile üretilen paslanmaz çelik silindirik parçanın Şekil 1’de gösterildiği gibi üretimi tamamlandıktan sonra aynı yöntem ve parametreler ile bir adet daha parça üretilmiştir. Bu parçalardan bir tanesi çekme, eğme ve sertlik testi ile mikroyapı incelemelerinde kullanılırken diğer parça torna tezgahında işlenerek üretimden kaynaklı olası hataların olup/olmadığının kontrolünde kullanılmıştır. Çekme testlerinde inşa yönü boyunca 4 adet ve eğme testi için 2 adet (1 içe eğme, 1 dışa eğme) numune alınmıştır. Şekil 2’de çekme testi için hazırlanan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 2. Çekme test numuneleri.

Çekme testleri 2 mm/dk çekme hızında 50 kN kapasiteli Shimadzu marka cihazla gerçekleştirilmiştir. Eğme testlerinde 100 ton kapasiteli hidrolik pres kullanılmış eğme numuneleri 180° eğilene kadar numuneye özgü tasarlanan kalıp arasında eğilmiştir. Eğme testi sonrası numunelerde meydana gelebilecek çatlak gibi olası yüzey hatalarının belirlenmesi için eğme numunelerine sıvı penetrant muayenesi uygulanmıştır. Sertlik testi ve mikroyapı çalışmalarında silindirik parçadan tornalama öncesi alınan ve tüm katmanları kapsayan numune kullanılmıştır. Mikroyapı/mikrosertlik numunesi sırasıyla 80, 120, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500 sulu kum zımparalarla zımparalanmıştır. Sonrasında parlatma keçisi ile sırasıyla 6 µ ve 1 µ boyutunda elmas pastalar kullanılarak parlatılmıştır. Parlatma işlemi tamamlanan numune %10 oksalik asit çözeltisinde 15 sn’lik periyotlar ile yaklaşık 60 sn. elektrolitik yöntemle

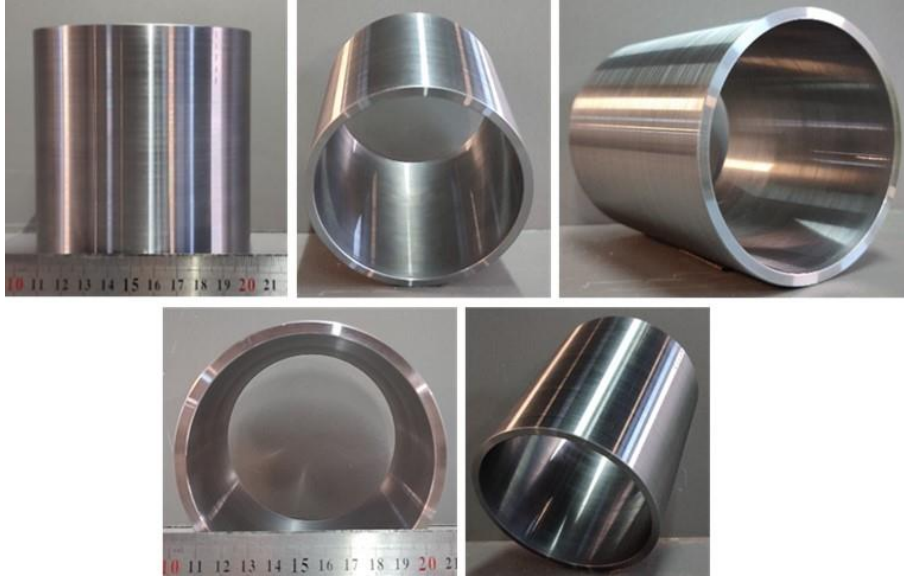
dağlanmıştır. Mikroyapı incelemelerinde Nikon Epiphot 200 optik mikroskop kullanılmıştır. Mikro sertlik ölçümlerinde Shimadzu HV 200 cihaz ile Vickers yöntemi kullanılmış, 500 g yük uygulanmış ve bekleme süresi 15 sn olarak seçilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Gözle Muayene

Gözle muayenede silindirik parçanın üretilmiş hali ve tormalandıktan sonraki durumu ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Şekil 1’de görselleri verilen silindirik parça üzerinde yapılan gözle muayene sonucunda, katmanlar arasında aşırı kayma, aşırı sarkma, eksenden kaçıklık, makro çatlak, makro gözenek vb. gibi hataların oluşmadığı, katmanların oldukça düzenli bir sırada üretilmiş olduğu gözlemlenmiştir. Ancak üretim esnasında silindirik parçanın katmanları oluşturulurken başlangıç ve bitiş noktalarında kısmi dikiş bozulmalarına rastlanılmış fakat katmanın üretimi tamamlandıktan ve sıcaklığının 80-90 °C düşmesini bekledikten sonra üretilen bir sonraki katmanın altta kalan kısmi bozuklukları giderdiği görülmüştür.

TAEİ yöntemi ile üretilen silindirik formda parçanın iç ve dış yüzelerinin istenilen çapa düşürülerek kullanılması gerekmektedir. Çünkü bu yöntemle üretilen parçaların yüzey pürüzlük değeri geleneksel yöntemlerle standart olarak üretilen parçalardan oldukça yüksektir. Şekil 3’te üretim sonrası tormalama işlemi uygulanan silindirik parça farklı açılardan gösterilmektedir. Parça üzerinde yapılan gözle muayenede eksenden kaçıklık, boşluk, makro çatlak ve makro gözenek gibi hatalara rastlanılmamıştır. Parça iç ve dış yüzey formunun gayet düzgün olduğu görülmüştür.



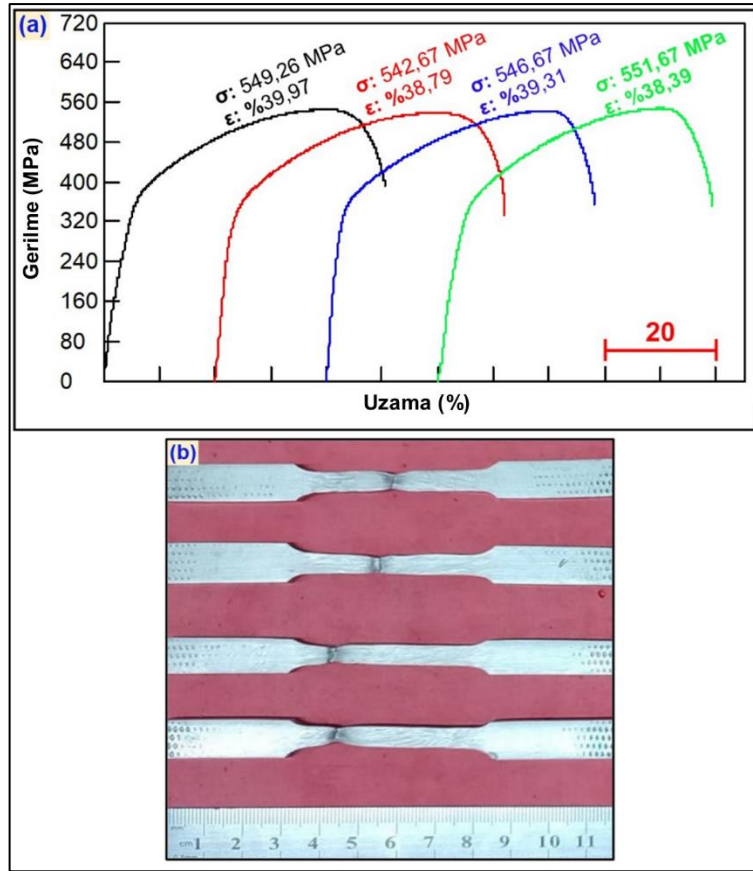
Şekil 3. Tormalanan TAEİ parçasının farklı açılardan görüntüleri.

3.2. Çekme Testi

Üretilen silindirik parçanın statik yük altındaki davranışlarının belirlenmesi için numunelere çekme testi yapılmıştır. Numunelerin çekme grafikleri ve çekme sonrası makro resimleri Şekil 4’te gösterilmiştir.

Çekme testlerinde silindirik parçanın ortalama çekme dayanımı yaklaşık 548 MPa ve ortalama maksimum uzaması yaklaşık %39 olarak hesaplanmıştır. Çekme testinde elde edilen dört ölçüm sonucunun (hem çekme dayanımı hem de % uzama miktarı) birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum parça üretim işleminde meydana gelebilecek hataların oluşmadığını göstermektedir. Bir başka ifade ile parçanın bir bütün olarak çekme dayanımı ve % uzama bakımından numune alınan bölgeler doğrultusunda homojen özellik sergilediği söylenebilir.

Wang vd. [16], TAEİ ile üretilen 316L yapısında 540 MPa değerinin bir miktar üzerinde çekme dayanımı elde etmişlerdir. Bir başka çalışmada aynı malzemede 559 MPa çekme dayanımı hesaplanmıştır [17]. 316L malzemesiyle blok tipi üretilen parçanın farklı bölgelerinden alınan numunelere uygulanan çekme testleri sonucunda ortalama 559.13 MPa çekme dayanımı ve %35.55 uzama hesaplanmıştır [18]. Çalışma sonucunda elde edilen (Çekme dayanımı: 548 MPa ve maksimum % uzama: %39) değerlerinin önceki çalışmalarla büyük ölçüde örtüştüğü görülmüştür. Ticari olarak bulunan 316L dövülebilir çeliğin çekme dayanımı kriteri 525-623 MPa olduğu belirtilmiştir [16]. Çalışmada hesaplanan dayanım değerleri bu aralıkta olduğundan üretilen silindirik parça ticari olarak temin edilebilen veya geleneksel yöntemlerle üretilen aynı malzemeli başka bir parçanın yerine kullanılabilir.



Şekil 4. a) Çekme testi grafikleri ve b) çekme testi sonrası numuneler.

3.3. Eğme Testi

Eğme testleri üretimden sonra TAEİ parçalarının ekstra şekil verilebilme kabiliyetini değerlendirmek üzere gerçekleştirilmiştir. Eİ ile üretilen yapılara kaynaklı numunelerin standartlarında mevcut olan kep ve kök eğme testlerinin yapılması mümkün değildir. Bunun yerine, silindirik parçanın iç ve dış yüzeyleri farklı termal ve soğuma çevrimlerine maruz kaldığından üretilen duvarların her iki yönüne eğme testi yapılmasının daha doğru olacağı düşünülmüştür. Silindirik parçadan alınan numunelere iki yönlü (içe ve dışa eğme) eğme testi yapılmış ve test sonrası numuneler Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Farklı açılardan eğme test numuneleri.

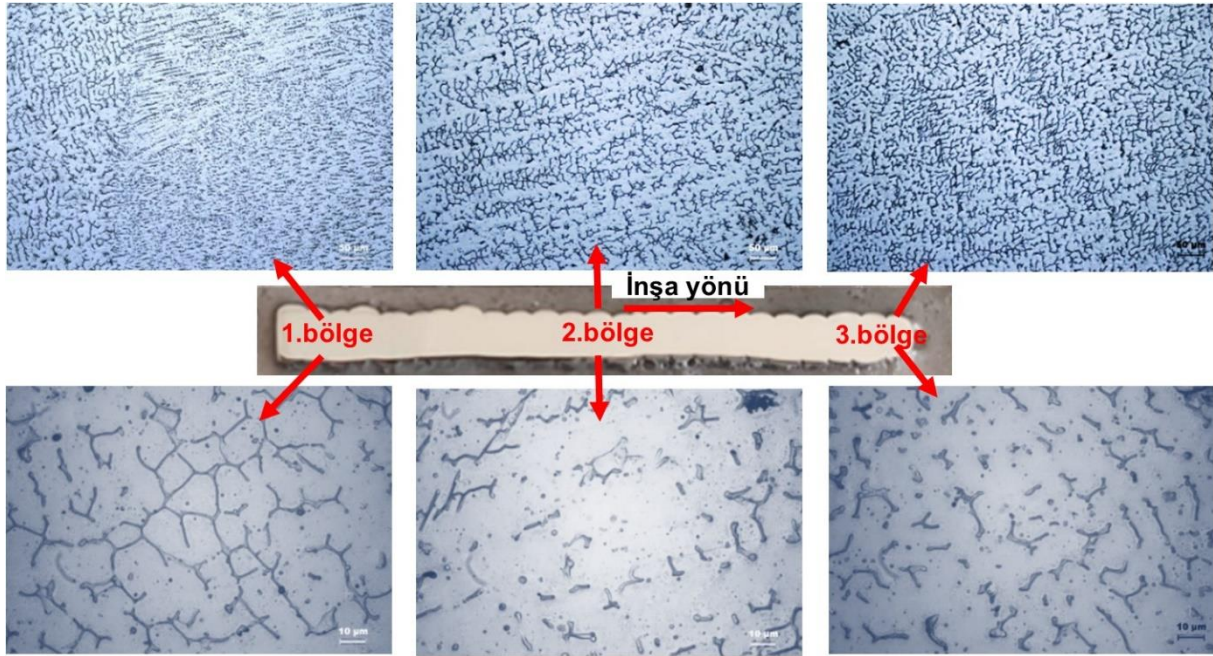
180° eğme testi esnasında ve sonrasında numunelerde gözle görülebilen çizik, çatlak ve kırılma gibi herhangi bir hata görülmemiştir. Bu durum ayrıca numunelere uygulanan sıvı penetrasyon testiyle de desteklenmiştir. Şekil 6'da eğme test numunelerine uygulanan sıvı penetrant muayene aşamaları gösterilmektedir. Muayene sonucunda numunelerde herhangi bir hata görülmemiştir. Bunlara ek olarak üretim işleminden kaynaklı gaz boşluğu ve yetersiz ergime gibi eğmede hasar oluşumunu tetikleyen kusurlara rastlanılmamıştır. Eğme testleri esnasında malzemelerin nötr eksene göre iç kısmı basma, dış kısmı ise çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Hem iç hem de dış eğme testlerinde herhangi bir hata bulunmaması üretimlerin eğme deneyi açısından başarılı olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 6. Sıvı penetrant muayenesi uygulanan eğme numuneleri.

3.4. Mikroyapı Çalışmaları

Mikroyapı çalışmaları üretilen parçanın Şekil 7’de gösterildiği gibi alt (1. bölge), orta (2. bölge) ve üst (3. bölge) bölgelerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 7’deki mikroyapı resimleri incelendiğinde özellikle 1. ve 2. bölgede östenit dentritleri ve δ ferrit yapısı görülmektedir. Alt kısımlarda dentrit tipi büyümeler gözlemlenmiş, büyümeler sıcaklık gradyanına bağlı olarak belirli bir yöne doğru gerçekleşmiştir. Katman sayısı arttıkça altta kalan bölgeler sürekli temperlendiği için yeniden kristalleşmeye uğrayan tanelerin büyüdüğü düşünülmektedir. Üst kısma doğru gidildikçe malzeme de mikroyapısal değişimlerin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi üst katmanların alt katmanlara göre daha az ısı girdisine maruz kalmasından kaynaklandığı olarak düşünülmektedir. Alt katmanlarda ısı girdisi sürekli devam ettiği için yapıda birden fazla ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olabileceği söz konusudur. Birden fazla ITAB ve sürekli ısı girdisi olmasının yapıda farklı mikroyapılara neden olabileceği düşünülmüştür. Üst katmanlar tekrarlı ısı girdisine daha az maruz kaldığı ve daha az temperlendiği için solucansı morfolojide delta-ferrit yapısı görülmüştür. TAEİ ile üretilen parça katmanları farklı ısı girdisi büyüklüğüne maruz kaldığından mikroyapıda farklılıklar olabileceği, tane boyutu, tane biçimi ve tane dizilimi gibi unsurların değişiklik gösterebileceği kaçınılmazdır.



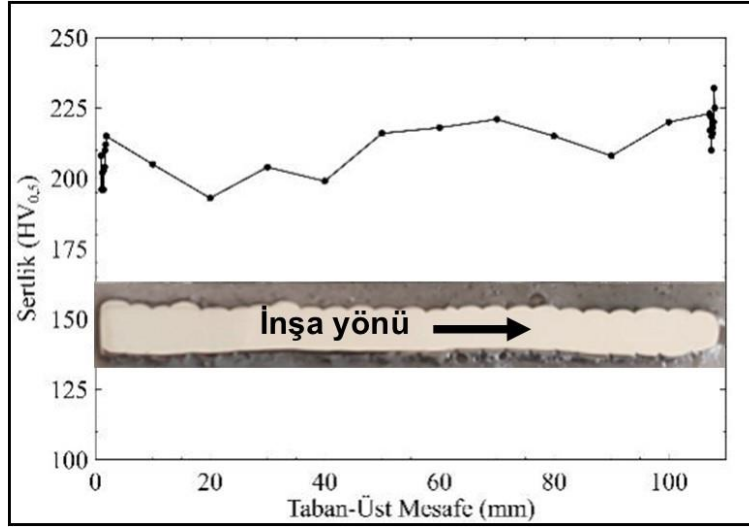
Şekil 7. Mikroyapı resimleri.

Önceki çalışmalarda benzer mikro yapılar rastlanılmıştır. Kumar vd. [19] 316L ile üretilen benzer bir üretimde östenitik+solucansı morfolojide (vermicular morphology) δ -ferrit yapısı gözlemlenmişlerdir. δ -ferrit yapısının TAEİ işleminde hızlı soğumadan dolayı tamamlanmamış difüzyon kontrol geçişinden kaynaklandığı belirtilmiştir [20].

3.5. Mikrosertlik Çalışmaları

Üretilen silindirik parçanın kesitinden alınan sertlik sonuçları Şekil 8’de grafik halinde verilmiştir. Ölçülen sertlik değerleri 193-232 HV arasında değişmektedir. Ortalama sertlik değeri 212 HV olarak hesaplanmıştır. En alt katmanlarda en düşük sertlik bulunmuş, sertlik orta kısımlarda birbirine yakın değerlerde devam etmiştir. Üst bölgelere bakıldığında ise sertlik değerinin arttığı gözlemlenmiş, bunun sebebinin ise soğuma hızının yüksek olmasından ve parçaya tekrarlı ısı girdisi olmadığından kaynaklandığı düşünülmüştür. Şekil 7’de verilen mikroyapı resimlerinde üç bölgedeki mikroyapı farklılığının sertlik ölçümlerine yansıtıldığı görülmüştür. Üretim

esnasında üretimi tamamlanan katmanların bir sonraki katmanda meydana getirdiği mikroyapı değişimlerinin sertliği de etkilediği belirlenmiştir.



Şekil 8. Sertlik grafiği.

4. Sonuçlar

Bu araştırma 316LSi paslanmaz çelikten TAEİ yöntemi kullanılarak istenilen boyutlarda silindirik parça üretmek amacı ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen silindirik parçanın mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, eğme ve sertlik testleri yapılmıştır. Metalürjik özellikler için ise makro yapı ve mikroyapı çalışmaları uygulanmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Üretilen silindirik parçanın makro yapısı incelendiğinde gözle görülebilir bir hataya rastlanmamıştır. Düzgün dikiş formunda oluşan katmanlı yapılar elde edilmiştir.
- Çekme testinde ortalama 548 MPa çekme dayanımı ve yaklaşık %39 maksimum uzama elde edilmiştir.
- İç ve dış iki yönlü olarak yapılan eğme testlerinde katmanlar arasında yırtılma, çatlak vb. gibi hatalara rastlanılmamış her iki numune sorunsuz olarak 180° eğilebilmiştir.
- Mikroyapı çalışmalarında östenit matrisi içerisinde δ -ferrit fazı görülmüştür.
- Silindirik parçadan alınan numunenin ortalama sertlik değeri 212 HV olarak hesaplanmıştır. Sertlik değeri orta bölgelerde ve uç noktalarda bir miktar değişmiştir.
- Çalışma sonucunda TAEİ yöntemiyle istenilen çap ve kalınlıkta paslanmaz çelik silindirik parça üretiminin gerçekleştirilebileceği görülmüştür. Uygulanan testler sonucunda bu parçanın diğer imalat yöntemleriyle üretilen veya ticari olarak bulunan bir başka bileşenin yerine kullanılabileceği sonucuna varılmıştır

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında (Proje başvuru no: 1919B012109830) desteklenmiştir.

Referanslar

1. X. Xing et al., "Microstructure Optimization and Cracking Control of Additive Manufactured Bainite Steel by Gas Metal Arc Welding Technology," J. of Materi Eng and Perform, vol. 28, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2019, doi: 10.1007/s11665-019-04203-y.
2. Y. Zhang, F. Cheng, and S. Wu, "Improvement of pitting corrosion resistance of wire arc additive manufactured duplex stainless steel through post-manufacturing heat-treatment," Materials Characterization, vol. 171, p. 110743, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matchar.2020.110743.
3. S. Li et al., "Comparative study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas," Additive Manufacturing, vol. 34, p. 101206, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101206.

4. S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire + Arc Additive Manufacturing," *Materials Science and Technology*, vol. 32, no. 7, Art. no. 7, May 2016, doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
5. R. D. Pütz, Y. Pratesa, L. Oster, R. Sharma, U. Reisgen, and D. Zander, "Microstructure and Corrosion Behavior of Functionally Graded Wire Arc Additive Manufactured Steel Combinations," *Steel Research Int.*, vol. 92, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2021, doi: 10.1002/srin.202100387.
6. J. Gu et al., "The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 651, pp. 18–26, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.msea.2015.10.101.
7. G. G. Goviazin, A. Shirizly, and D. Rittel, "Static and dynamic mechanical properties of wire and arc additively manufactured SS316L and ER70S6," *Mechanics of Materials*, vol. 164, p. 104108, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.mechmat.2021.104108.
8. L. Palmeira Belotti, J. A. W. van Dommelen, M. G. D. Geers, C. Goulas, W. Ya, and J. P. M. Hoefnagels, "Microstructural characterisation of thick-walled wire arc additively manufactured stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 299, p. 117373, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117373.
9. R. Pramod, S. M. Kumar, B. Girinath, A. R. Kannan, N. P. Kumar, and N. S. Shanmugam, "Fabrication, characterisation, and finite element analysis of cold metal transfer-based wire and arc additive-manufactured aluminium alloy 4043 cylinder," *Weld World*, vol. 64, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2020, doi: 10.1007/s40194-020-00970-8.
10. F. Wang, S. Williams, P. Colegrove, and A. A. Antonysamy, "Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V," *Metall and Mat Trans A*, vol. 44, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2013, doi: 10.1007/s11661-012-1444-6.
11. H. Zhang et al., "Fabricating Pyramidal Lattice Structures of 304 L Stainless Steel by Wire Arc Additive Manufacturing," *Materials*, vol. 13, no. 16, Art. no. 16, Aug. 2020, doi: 10.3390/ma13163482.
12. A. Kumar and K. Maji, "Microstructure and Chemical Composition Analysis of Double Wire Arc Additive Manufactured Bimetallic Structure," *J. of Mater Eng and Perform*, vol. 30, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2021, doi: 10.1007/s11665-021-05819-9.
13. T. A. Rodrigues et al., "Effect of heat treatments on 316 stainless steel parts fabricated by wire and arc additive manufacturing : Microstructure and synchrotron X-ray diffraction analysis," *Additive Manufacturing*, vol. 48, p. 102428, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102428.
14. B. P. Nagasai, S. Malarvizhi, and V. Balasubramanian, "Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 36, pp. 100–116, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.cirpj.2021.11.005.
15. B. P. Nagasai, S. Malarvizhi, and V. Balasubramanian, "Mechanical properties and microstructural characteristics of wire arc additive manufactured 308 L stainless steel cylindrical components made by gas metal arc and cold metal transfer arc welding processes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 307, p. 117655, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2022.117655.
16. L. Wang, J. Xue, and Q. Wang, "Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 751, pp. 183–190, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.02.078.
17. V. V. Sathiyamurthy S, P. J. Harsh Vardhan, S. S., and S. P. K., "Tensile, Hardness, XRD and Surface Vonmises Stress of 316 L Stainless Steel Built by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)," *JME*, vol. 17, no. 3, pp. 098–103, Sep. 2022.
18. C. Wang, T. G. Liu, P. Zhu, Y. H. Lu, and T. Shoji, "Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel fabricated by CMT wire and arc additive manufacturing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 796, p. 140006, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.msea.2020.140006.
19. D. Kumar, S. Jhavar, A. Arya, K. G. Prashanth, and S. Suwas, "Mechanisms controlling fracture toughness of additively manufactured stainless steel 316L," *Int J Fract*, vol. 235, no. 1, pp. 61–78, May 2022, doi: 10.1007/s10704-021-00574-3.

20. K. Yang, Q. Wang, Y. Qu, Y. Jiang, and Y. Bao, "Microstructure and Corrosion Resistance of Arc Additive Manufactured 316L Stainless Steel," *J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit.*, vol. 35, no. 5, Art. no. 5, Oct. 2020, doi: 10.1007/s11595-020-2339-9.