



Tel Ark Eklemeli İmalat: Son Gelişmeler ve Değerlendirmeler**

Serkan Güler¹, H. Tarık Serindağ², Gürel Çam³

ÖZ

Yenilikçi bir imalat teknolojisi olan metal eklemeli imalat (MEİ) günümüzde havacılık-uzay, enerji, otomotiv, tıp gibi çeşitli endüstriyel alanlarda uygulanmaktadır. Bu imalat yöntemlerinde metal parçaların üretimi, üç farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlar toz sermeli ergitme, toz beslemeli ergitme ve tel eklemeli ergitme sistemleridir. Bu yöntemlerden ilk ikisinde hammadde olarak metal veya alaşım tozları kullanılırken üçüncü yöntemde metal veya alaşımlardan imal edilmiş ilave tel başlangıç malzemesidir. Ancak, metal tozlarının özellikle de alaşım tozlarının maliyetleri oldukça yüksektir. Bu da tel kullanılarak yapılan eklemeli metal parça üretimini oldukça cazip hale getirmektedir. Tel ark eklemeli üretimin (TAEİ) diğer bir avantajı da, küçük ve orta büyüklükteki parçaların ekonomik olarak ilk yüksek hızda üretilebilmesi potansiyelidir. Günümüzde, bu yenilikçi imalat teknolojisi Ti ve alaşımları, Al ve alaşımları, Ni-esaslı alaşımlar ve çelik gibi değişik mühendislik malzemelerinden parça üretiminde ümit vadeden bir üretim teknolojisi olarak kabul edilmektedir. Bu makalede tel ark eklemeli imalat konusundaki çalışmalar ve yaygın kullanılan metalik teller tartışılacak ve bu yöntem ile üretilen parçaların içyapı ve mekanik özellikleri ele alınacaktır. Ayrıca, TAEİ’de karşılaşılan deformasyon, porozite ve çatlak oluşumu gibi hatalar ve bunların nedenleri de tartışılacaktır. Son olarak bu üretim yönteminin metal parça imalatında yaygın olarak kullanılabilmesi için aşılması gereken sorunlar özetlenecektir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli üretim, Tel ark eklemeli imalat, 3-boyutlu baskı, on ürüne eş şekilli üretim

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): Recent Developments and Prospects

ABSTRACT

Metal additive manufacturing (MAM) which is an innovative technology is presently being applied in various industries such as aeronautics-space, energy, automotive, and medicine. Metal parts are produced in three different ways in metal additive manufacturing methods. These are powder bed fusion, powder fed fusion and wire fed fusion systems. In the first two of these methods, metal or alloy powders are used as raw materials, while in the third method, the filler wire made of metal or alloys is the starting material. However, metal powders, especially alloy powders, are quite costly. This in turn makes the production of metal parts using filler wire very attractive. Another advantage of wire arc additive manufacturing (WAAM) is its potential to produce small- and medium-sized parts economically with high deposition rate. Nowadays, this innovative manufacturing technology is being considered a promising fabrication technology for manufacturing several products from various engineering materials such as titanium and its alloys, aluminum and its alloys, nickel-based alloys and steels. In this paper, studies on WAAM and commonly used metallic wires and the microstructure and mechanical properties of the parts produced by this method will be discussed. In addition, defects such as deformation, porosity and crack formation encountered in WAAM and their reasons will also be discussed. Finally, the problems which have to be overcome for a wider application of this production method in the manufacturing of metallic parts, will be summarized.

Keywords: Additive manufacturing, Wire arc additive manufacturing (WAAM), 3-D printing, Net shape production

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 15.09.2021

Kabul/Accepted : 18.10.2021

** 19-20 Kasım 2021 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından Ankara’da düzenlenen Kaynak Teknolojisi 12. Ulusal Kongre ve Sergisi’nde sunulan bu bildiri, dergimiz için yazarınca makale olarak yeniden düzenlenmiştir.

¹ Dr., İskenderun Teknik Üniv., Müh. ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, İskenderun-Hatay serkan.guler@iste.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1552-3432

² Dr.-Öğr. Üyesi, İskenderun Tek. Üniv., Hav. ve Uzay Bil. Fak., Havacılık ve Uzay Müh. Bölümü, İskenderun-Hatay htarik.serindag@iste.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3864-8147

³ Prof. Dr., İskenderun Tek. Üniv., Müh. ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, İskenderun-Hatay htarik.gurel.cam@iste.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0222-9274



EXTENDED ABSTRACT

Introduction/ Background

Additive manufacturing, also called 3D printing, direct digital manufacturing, or freeform manufacturing, and, is the process of combining materials that are often layered on top of each other to produce parts from 3D model data, in contrast to forming processes and subtractive manufacturing methods such as machining. Additive manufacturing methods developed for the manufacture of metallic parts are called metal additive manufacturing (MAM). Metal additive manufacturing processes can be classified into three main groups in terms of raw materials used in production and feeding the raw material to the system. These are: (i) powder-bed systems, (ii) powder-feed systems, and (iii) wire-feed systems.

Objectives/ Research Purpose

Compared to additive manufacturing methods in which metal or alloy powder is used as raw material, wire arc additive metal part production (WAAM) has become more attractive in recent years, especially in our country. There are two reasons for this: (i) the high cost of metal powders, especially alloy powders, and (ii) the very limited or non-existing metal powder production in our country. On the other hand, filler wire production from any kind of metal or alloy can be easily carried out in our country. This further increases the importance of metal part production using wire arc additive metal part manufacturing. For this reason, studies on wire arc additive manufacturing and commonly used metallic wires and the microstructure and mechanical properties of the parts produced by this method are discussed in this article. In addition, defects such as deformation, porosity and crack formation encountered in wire arc additive manufacturing and their causes are also discussed. Finally, the problems that need to be overcome in order for this production method to be widely used in metal parts manufacturing are summarized.

Methods/ Methodology

Depending on the heat source used in the process, WAAM processes are commonly divided into four groups. These are: 1) Gas metal arc welding (GMAW) based WAAM, 2) Gas tungsten arc welding (GTAW) based WAAM, 3) Plasma arc welding (PAW) based WAAM and 4) Robotic WAAM methods. In WAAM methods, wires produced for the welding industry available in the market are used. In this context, many alloy wires are manufactured and these wires can be supplied wound on reels (coils). Among the most studied materials for wire arc additive manufacturing are Ti-alloys (Ti-6Al-4V), Ni-based superalloys (IN625, IN718), Al-alloys (2xxx, 4xxx, 5xxx series alloys) and Mg-alloy (AZ31), Fe-Al intermetallic, Al/Ti compounds, steel-nickel, steel-bronze.

Results/ Findings

Wire arc additive manufacturing processes offer the following advantages:

- Many of the arc welding methods can be used in this manufacturing process.
- It is a low cost manufacturing method with low material waste.
- Various complex shaped parts can be manufactured from many different types of metal.
- Deposition rate can be increased by feeding more than one similar or different additional wire.
- It is possible to manufacture medium and large sized parts, especially by using arc methods and multiple wire feeding owing to the high deposition capacity obtained in these systems.
- The method offers the potential to produce intermetallic composite parts and functionally graded parts using different wires.
- It has also the potential to be used in parts repair, particularly in local repair work.

Discussion and Conclusions

The properties of the parts fabricated by wire arc method, which is one of the metal additive manufacturing processes, depend on the material, the welding process used and the control of the process parameters. Therefore, in-depth understanding of various materials, ideal process design, parameter control during the process and post-production process are very important for the production of a high quality part.



The WAAM process is an inherently unstable thermal process. Therefore, it is difficult to predict and control the microstructure that will occur after the production. Therefore, some defects are encountered in products manufactured by the WAAM method, depending on the material properties and process parameters being employed. In recent years, it has been the main research topic to produce high quality parts with good mechanical performance by eliminating or reducing deposition defects, thus making the WAAM method more competitive against other additive manufacturing methods.

Measures to eliminate the formation of defects in the parts produced by the WAAM method are important. The first of these is the selection of the most appropriate WAAM process for a given material to increase process stability and reduce defects in the manufactured part. The second is the use of system-integrated and reliable process monitoring and control systems to maintain process stability and improve production quality. The development of in-process monitoring methods makes it possible to repair any defect in the part not only after the part is manufactured, but also immediately after the defect occurs (at the end of the final layer). Therefore, in-process monitoring and control can result in significant material savings and shorter production times. Another approach that can be used to improve the microstructure and mechanical properties of parts produced with WAAM is interpass cooling. Interpass cooling can be applied with a movable gas nozzle that provides rapid cooling on the manufactured part during and/or after the deposition of each layer. By using such rapid cooling, the layer temperature and heat cycle during the process can be controlled to achieve the desired microstructure and mechanical properties. Although this technique also potentially has the potential to reduce residual stresses and distortion, this issue has not yet been adequately explored. In addition, parts produced with WAAM from most materials require post-production heat treatment to improve mechanical properties. This heat treatment not only improves the properties of the part, but also reduces surface roughness and porosity, and removes residual stresses and distortion.

The WAAM method is a candidate technology to become a commercial manufacturing process and replace the existing manufacturing processes used in the production of many aerospace parts from billet or forged products. However, a general purpose WAAM system similar to the commercially available powder bed fusion systems has not yet been developed, although a great deal of research has been carried out in various fields such as process planning, programming and materials work in recent years. This limits the widespread industrial use of WAAM technology. In addition, many different WAAM systems need to be developed due to different requirements for different engineering materials and varying scale of manufacturing. Another aspect that will enable more widespread use of wire arc additive manufacturing is the following. Optimum microstructure and therefore high mechanical properties in the parts produced with this manufacturing method can be optimized by new wire composition designs. In this context, special alloying elements are added to the wire to be used in the process to obtain the desired microstructures, thus improving the mechanical properties. There is also the potential to produce large size functional graded products for special applications, owing to the wire mixing facility available in the method. It is also thought that the development of new cored wires will make it possible to produce parts with the desired chemical composition by wire arc additive manufacturing.



1. GİRİŞ

Üç boyutlu baskılama, katmanlı imalat, doğrudan dijital imalat ya da serbest şekilli üretim adları da verilen eklemeli imalat veya eklemeli üretim, makineyle işleme gibi çıkarmalı (eksiltmeli) üretim yöntemleri ve şekillendirme işlemlerinin aksine, malzemelerin 3 boyutlu model verilerinden parçalar üretmek için genellikle üst üste katmanlar şeklinde birleştirilmesi sürecidir. Katmanlı imalat, başlangıçta yaygın olarak polimerik malzemelerden prototip üretiminde kullanılsa da, son yıllarda bu imalat teknolojisi ile metalik parçaların üretimi büyük ilgi çekmektedir. Bu yenilikçi imalat teknolojisi metal eklemeli imalat olarak da adlandırılmaktadır ve günümüzde havacılık-uzay, enerji, otomotiv, tıp, çeşitli aletler ve tüketici ürünleri gibi çeşitli endüstriyel alanlarda uygulanmaktadır.

Eklemeli üretim (EÜ) teknolojisi grafik tasarım, dijital kontrol ve işleme/kaynak işlemlerini birleştirdiğinden, bir başka deyişle bu işlemlerin eş zamanlı olarak yapılmasını sağladığından dolayı, üretim süresinden ve maliyetinden tasarruf edilmesini sağlamaktadır. Bu yenilikçi üretim yöntemi ile karmaşık şekilli parçalar ince katmanların üst üste eklenmesi ile son ürüne eş şekilli olarak (ek işlem gerektirmeyecek şekilde) veya son ürüne yakın şekilli olarak (çok az talaşlı işlem gerektirecek şekilde) üretilebilmektedir [1-25]. Dolayısıyla, bu yeni üretim teknolojisinin hurdaya giden atık malzemenin (firenin) çok düşük olması nedeniyle parça maliyetini düşürme potansiyeli de bulunmaktadır.

Metalik parça imalatına yönelik geliştirilen eklemeli imalat yöntemlerine metal eklemeli imalat (metal additive manufacturing – MAM) denilmektedir. Metal eklemeli imalat işlemleri malzeme besleme şekli, kullanılan enerji kaynağı ve üretilen parçanın hacmi bakımından sınıflandırılabilir. Ancak, üretimde kullanılan hammadde ve hammaddenin sisteme beslenmesi bakımından sınıflandırma daha uygundur ve bu açıdan metal eklemeli imalat işlemleri başlıca üç gruba ayrılabilir. Bunlar: (i) toz sermeli (yataklı) sistemler, (ii) toz beslemeli sistemler ve (iii) tel beslemeli sistemlerdir [14].

Metal veya alaşım tozunun hammadde olarak kullanıldığı eklemeli imalat yöntemlerine nazaran tel ark eklemeli metal parça üretimi (WAAM) son yıllarda özellikle ülkemizde daha cazip hale gelmektedir. Bunun iki nedeni vardır: Bunlar: (i) metal tozlarının özellikle de alaşım tozlarının yüksek maliyetli olması ve (ii) ülkemizde metal tozu üretiminin çok sınırlı veya olmamasıdır. Özellikle metal ve alaşım tozlarının temininde yurt dışına bağımlı olunmasının bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunların başında, savunma sanayi gibi stratejik alanlarda bazı uçak veya IHA/SIHA parçaları gibi metalik parçaların imalatında kullanılan tozlara uygulanan ambargo nedeniyle üretiminin yapılamaması veya gecikmesi gibi sıkıntılar gelmektedir.

Diğer taraftan, her türlü metal veya alaşımdan ilave tel üretimi rahatlıkla ülkemizde gerçekleştirilebilir. Bu durum, tel ark eklemeli metal parça üretiminin önemini daha

da artırmaktadır. Ayrıca, tel ark eklemeli imalat yöntemi oldukça büyük metalik parçaların (>10 kg) ekonomik olarak ve yüksek hızda üretilebilmesi potansiyeli de sunmaktadır [9]. Bunlara ek olarak, yöntemin diğer avantajları arasında düşük ekipman maliyeti, yüksek malzeme kullanımı diğer bir deyişle düşük atık miktarı ve dolayısıyla çevre dostu olması da sayılabilir. Bunun sonucu olarak, tel ark eklemeli imalat son yıllarda tüm dünyada imalat sanayinden giderek artan bir ilgi görmeye başlamıştır. Ancak, tel ark eklemeli imalat yönteminde genel olarak her bir tabakanın yüksekliği 1-2 mm civarında olup bunun sonucu yüzey pürüzlülüğü 200 mikron civarındadır [9,15,24]. Dolayısıyla, toz kullanılan eklemeli imalat işlemleri gibi diğer eklemeli imalat yöntemlerinin aksine son ürüne eş şekilli üretim olarak değerlendirilemez ve parçada mutlaka ek işlem gerekmektedir.

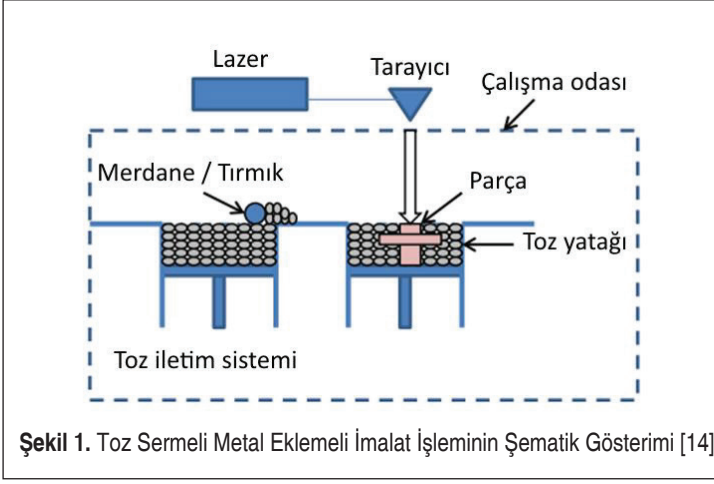
2. METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ

Daha önce belirtildiği üzere metal eklemeli üretim işlemleri, üretimde kullanılan ham madde ve hammaddenin sisteme beslenmesi bakımından başlıca üç gruba ayrılabilir. Bunlar: (i) toz sermeli (yataklı) sistemler (powder bed systems), (ii) toz beslemeli sistemler (powder feed systems) ve (iii) tel beslemeli sistemlerdir (wire feed systems).

Toz sermeli ve beslemeli ergitme (powder bed and powder feed fusion) yöntemlerinde toz halindeki hammadde elektron, lazer ve ark gibi uygun bir enerji kaynağı kullanılarak ergitilmekte ve üst üste tabakalar halinde biriktirilerek imalat gerçekleştirilmektedir. Diğer taraftan, tel ark eklemeli imalat yöntemi (wire arc additive manufacturing - WAAM), sürekli beslenen ilave telin bir ark ısı kullanılarak ergitilmesi ve üst üste katmanlar şeklinde biriktirilmesi ile yapılan bir eklemeli imalat yöntemidir.

2.1 Toz Sermeli Metal Eklemeli İmalat

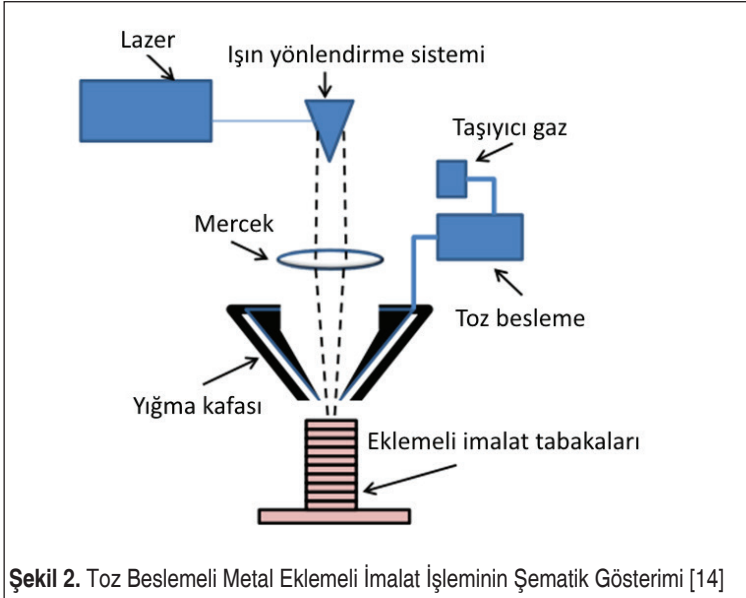
Şekil 1'de toz sermeli (yataklı) metal eklemeli imalat işlemi şematik olarak gösterilmektedir [14]. Şekilden görüleceği üzere, toz sermeli metal eklemeli imalat işleminde çalışma alanı boyunca (yatak boyutu: maksimum 250x250 mm) tozun serilmesiyle bir toz yatağı oluşturulur. Bu toz yatağı, bilgisayar kontrollü bir ısı kaynağı (lazer veya elektron ışını gibi) kullanılarak ergitilir. Daha sonra, ikinci tabakayı oluşturmak için ergitilen tabakanın üzerine tekrar toz serilir ve ergitilir. Bu toz serme-ergitme işlemi üretilmek istenilen üç boyutlu metalik parça şekli elde edilinceye kadar tekrar edilir [14,24,26-29]. Toz yatağı ergitmeli metal eklemeli imalat uygulamaları arasında en popüler olanları seçici lazer ergitme (selective laser melting - SLM), seçici lazer sinterleme (selective laser sintering - SLS) de denilen doğrudan lazer ile metal sinterleme (direct metal laser sintering - DMLS) ve elektron ışını ile ergitme (electron beam melting - EBM) yöntemleridir. Bu eklemeli imalat sistemlerinin avantajları arasında boyut hassasiyeti yüksek parça üretilebilmesi, parçada iç boşluklar ve kanallar gibi detayların oluşturulabilmesi ve hassas boyut kontrolü sayılabilir.



Şekil 1. Toz Sermeli Metal Eklemeli İmalat İşleminin Şematik Gösterimi [14]

2.2 Toz Beslemeli Metal Eklemeli İmalat

Şekil 2’de toz beslemeli metal eklemeli imalat işleminin şematik olarak gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere bu sistemlerde, tozlar bir nozul vasıtasıyla çalışma alanı boyunca beslenir (taşınır) [14]. Tozun bir veya daha fazla tabakasını ergiterek arzu edilen şekle dönüştürmek için bir ısı kaynağı (örneğin bir lazer sistemi) kullanılır. Bu işlem, katı bir üç boyutlu parça oluşturuluncaya kadar tekrarlanır [14,24,30,31].

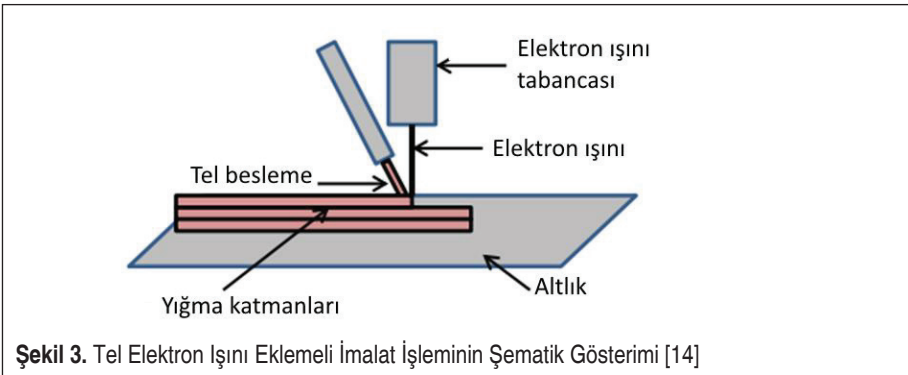


Şekil 2. Toz Beslemeli Metal Eklemeli İmalat İşleminin Şematik Gösterimi [14]

Toz beslemeli metal eklemeli imalata doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition - DED) tekniği de denilmektedir. Ancak, bu ifade, tel beslemeli metal eklemeli imalatı da kapsamaktadır. Bu yüzden toz beslemeli metal eklemeli imalat ifadesi daha doğrudur. Toz beslemeli metal eklemeli imalat işleminin iki farklı versiyonu bulunmaktadır. Bunlar: 1) iş parçası sabit, toz besleme ünitesi (kafası) hareketli ve 2) toz besleme ünitesi sabit, iş parçası hareketli sistemdir. Toz eklemeli imalat uygulamaları arasında en popüler olanları lazerle parça (katı) şekillendirme (laser solid forming -LSF) ve plazma ile biriktirmeli imalat (plasma deposition manufacturing - PDM) yöntemleridir. Bu toz eklemeli sistemlerin avantajları ise toz sermeli metal eklemeli işlemlere nazaran daha büyük hacimli parçaların üretilebilmesi ve daha yüksek üretim hızı ve aşınmış-hasarlı parçaların tamirinin yapılabilmesidir.

2.3 Tel Beslemeli Metal Eklemeli İmalat

Şekil 3'te, serbest şekil üretimi (freeform fabrication - FFF) ve doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition - DED) tekniği de denilen tel beslemeli metal eklemeli imalat işleminin bir uygulaması olan tel elektron ışını eklemeli imalat işlemi, şematik olarak gösterilmektedir [14]. Şekilden görüleceği üzere, bu eklemeli imalat işleminde hammadde tel şeklindedir. İşlem başlangıcında telin ergitilmesi ve çalışma alanı boyunca biriktirilmesi ile bir tabaka oluşturulur. Bu telin ergitilmesi ile tabaka oluşturulması yeterli sayıda tekrarlanarak üç boyutlu bir parça üretilir [8-11,13,14,16-25, 32-37]. Bu işlemde kullanılan ısı kaynakları arasında elektron ışını, lazer ışını ve ark sistemleri sayılabilir. Kullanılan ısı kaynağına bağlı olarak tel beslemeli metal eklemeli imalat işlemleri üç gruba ayrılabilir. Bunlar: 1) tel elektron ışını eklemeli imalat (electron beam additive manufacturing - EBAM or electron beam forming - EBF), 2) tel lazer ışını eklemeli imalat (wire laser additive manufacturing - WLAM or laser metal deposition with wire - LMD-x) ve 3) tel ark eklemeli imalat (wire arc additive manufacturing - WAAM) yöntemleridir.

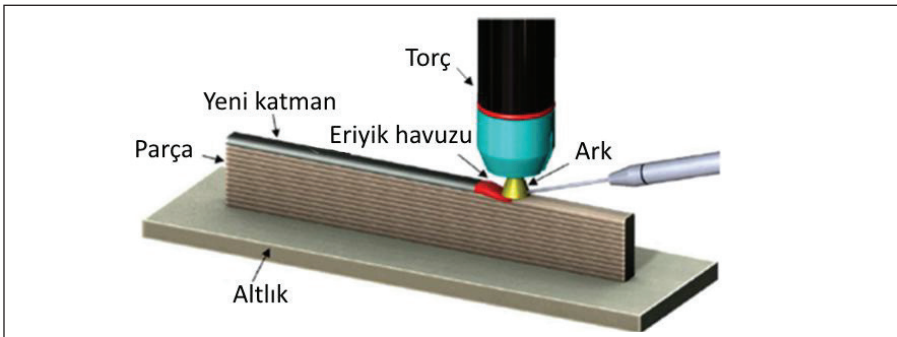


Lazer, diğer yöntemlerle mukayese edildiğinde en yüksek hassasiyete sahip olduğu için tel eklemeli imalat işlemi için en çok tercih edilen kaynak yöntemidir [24]. Ancak, enerji verimliliği çok düşüktür (% 2-5) [35]. Elektron ışınının enerji verimliliği biraz daha yüksektir (% 15-20) [36], ancak yüksek vakumlu bir çalışma ortamı gerektirir. Dolayısıyla, bu yöntemde parça üretim maliyeti yüksek olduğundan sadece havacılık alanında bazı parçaların üretimi için kullanılma potansiyeli bulunmaktadır. Lazer ve elektron ışınının zayıf enerji verimliliği ile karşılaştırıldığında, gaz metal ark kaynağı (GMAK) veya gaz tungsten ark kaynağı (GTAK) işlemleri gibi ark kaynağı işlemlerinin enerji verimliliği bazı durumlarda % 90'a kadar çıkmaktadır [37]. Ek olarak, geleneksel ark kaynağı ekipmanının maliyeti, lazer veya elektron ışını ekipmanı ile karşılaştırıldığında nispeten düşüktür.

Genel olarak, tel besleme sistemleri yüksek biriktirme gerektiren işlemler için çok uygundur. Diğer bir deyişle tel beslemeli sistemlerde üretim hızları oldukça yüksektir. Ayrıca, büyük hacimli parçaların üretilebilmesi de mümkündür. Ancak, bu yöntemle üretilen parçaların yüzeyi toz sermeli ve toz beslemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçalara nazaran daha pürüzlü olduğundan daha fazla ek işlem gerektirmektedir.

3. TEL ARK EKLEMELİ İMALAT SİSTEMLERİ

Isı kaynağı olarak kullanılan bir elektrik arkı ile tel formunda (şeklinde) bir hammaddenin ergitilerek üst üste katmanlar şeklinde biriktirilmesiyle parça imalatı tel ark eklemeli imalat (wire arc additive manufacturing - WAAM) olarak adlandırılır. Şekil 4'te tel ark eklemeli imalat işlemi şematik olarak gösterilmektedir [38]. Bu yöntem ilk defa 1925 yılında Baker [39] tarafından metal süs eşyalarının imalatında kullanılmıştır. Ancak, eklemeli imalat işlemlerinde kullanılması üzerine araştırmalar 1990lı yıllardan beri yürütülmektedir [40]. Bu çalışmalar sonucu, son yıllarda, özellikle de son 10-15 yılda, yöntemin gelişmesi ve kullanımı hızla artmıştır. Günümüzde, WAAM tekniği titanyum alaşımları, nikel alaşımları, alüminyum alaşımları ve çelik

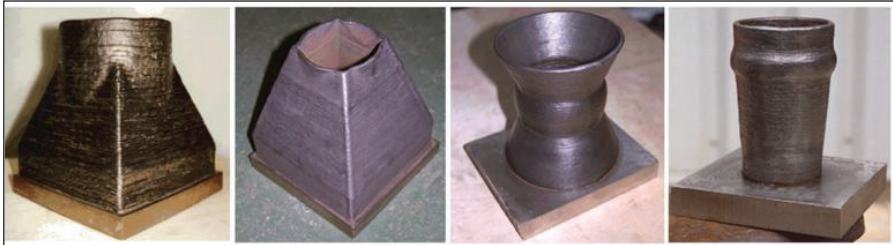


Şekil 4. Tel Ark Eklemeli İmalat İşlemi İle Tek Pasoda Parça Üretiminin Şematik Gösterimi [38]

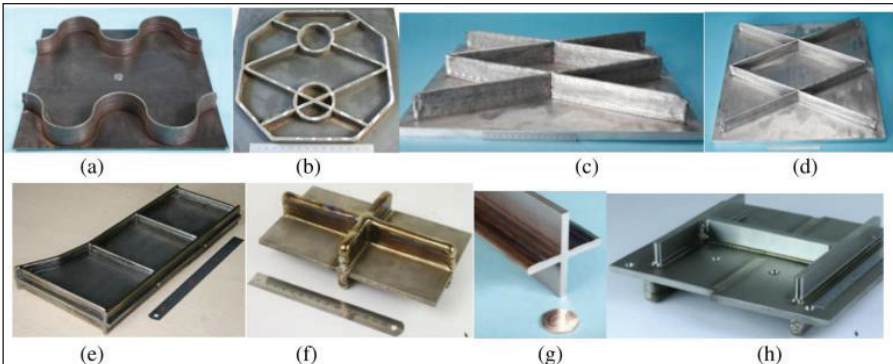
gibi çeşitli mühendislik malzemelerinden parça imalatı için gelecek vaat eden bir üretim yöntemi haline gelmiştir [22]. Örneğin, WAAM teknolojisindeki son gelişmeler sayesinde, Ti-6Al-4V iniş takımı parçaları, alüminyum kanat kirişleri ve çelik rüzgar tüneli modelleri ve koniler olmak üzere çok değişik parçalar bu işlemle başarıyla üretilmiştir [9]. WAAM teknolojisi üretilen parçalara bazı örnekler Şekil 5 ve 6'da verilmektedir [24].

Geleneksel eksiltmeli (talaşlı) imalat işlemleri ile karşılaştırıldığında, tel ark eklemeli imalat sistemleri parça ebatlarına bağlı olarak imalat süresini %40-60 arasında ve ek işleme süresini %15-20 arasında kısaltır [22]. Ayrıca, daha yüksek üretim hızına ilaveten malzeme sarfiyatını azalttığı için parça maliyetini de düşürür. Bunlara ek olarak, bu imalat yöntemi tasarım özgürlüğünde bir artış sağlar ve bunun sonucunda ağırlık tasarrufu sağlamanın yanı sıra daha önce birçok alt bileşenden yapılmış karmaşık montajların üretimini kolaylaştırır [41].

WAAM sistemlerinde günümüzde standart piyasada mevcut kaynak ekipmanları (güç kaynağı, kaynak kafası ve tel besleme sistemi) kullanılmaktadır. Yöntemde kullanılan



Şekil 5. GMAK-Tabanlı WAAM Yöntemiyle Üretilmiş Bazı Parçalar [24]



Şekil 6. WAAM Yöntemiyle Üretilmiş Destekli Paneller: (a) ve (b) Sade C'lu Çelik, (c) ve (d) Alüminyum, (e) Ti Destekli Panel, (f) Ti Kalın Cidarlı Geçiş Bağlantı Elemanı, (g) Ti Kalıntı Gerilmesi Dengelenmiş Çapraz Kiriş (travers) ve (h) Ti kalıp (ek işlem yapılmış) [24]

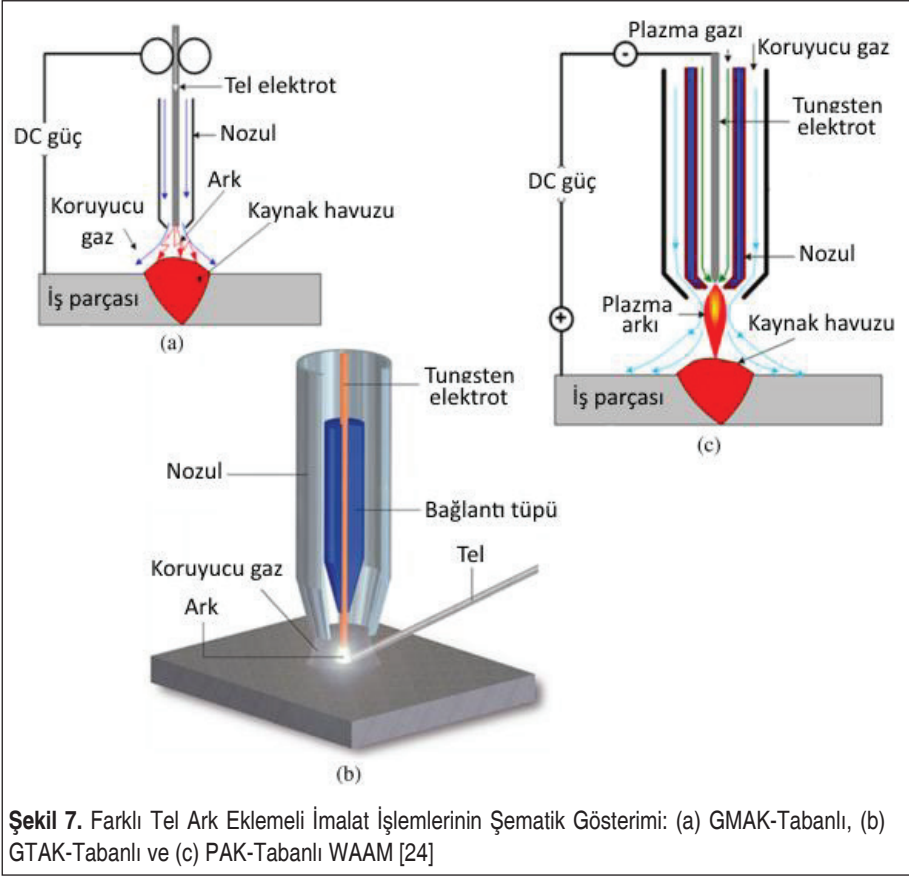


tellerin çapı genel olarak 0.2 to 1.2 mm arasındadır [24]. Isı kaynağının hareketi, robotik sistemler veya bilgisayarlı sayısal kontrollü portallar tarafından sağlanabilmektedir. İşlem stratejisi ve kaynak yolunu (path) kontrol etmek için robotik sistemlerin kullanımı, nihai ürünün kalitesini önemli oranda etkilemektedir [9,13,24,25]. Daha önce bahsedildiği gibi, bu imalat tekniğinin son yıllarda giderek artan bir şekilde kullanılmasına rağmen WAAM'ın oldukça karmaşık doğası nedeniyle, işlem geliştirme, malzeme kalitesi ve performansı, yol tasarımı ve programlama, süreç modelleme, süreç izleme ve çevrimiçi kontrol dâhil olmak üzere sürecin birçok farklı yönünün araştırılması gerekmektedir [6].

3.1 Tel Ark Eklemeli İmalat Sistemlerinin Sınıflandırılması

İşlemede kullanılan ısı kaynağına bağlı olarak, WAAM işlemleri yaygın olarak dört gruba ayrılmaktadır [22,24,42]. Bunlar: 1) Gaz metal ark kaynağı (GMAK) tabanlı WAAM, 2) Gaz tungsten ark kaynağı (GTAK) tabanlı WAAM, 3) Plazma ark kaynağı (PAK) tabanlı WAAM ve 4) Robotik WAAM yöntemleridir. Bu farklı WAAM uygulamalarından GMAK-tabanlı, GTAK-tabanlı ve PAK-tabanlı WAAM yöntemleri şematik olarak Şekil 7'de gösterilmektedir. Tablo 1'den görüleceği üzere, bu yöntemlerin her birinin kendine özgü özellikleri söz konusudur. Dolayısıyla, WAAM tekniğinin seçimi hedeflenen parça üretimi için gerekli işlem koşullarını ve üretim hızını doğrudan etkiler. Örneğin, GMAK-tabanlı WAAM yöntemindeki biriktirme hızı tüketilir elektrot kullanıldığından GTAK-tabanlı WAAM ve PAK-tabanlı WAAM yöntemlerindeki biriktirme hızlarının 2-3 katı civarındadır. Ancak, GMAK-tabanlı WAAM yönteminde ark kararlılığı daha düşük olup, bu yöntemde daha fazla kaynak dumanı açığa çıkmakta ve elektrik akımı direk ilave tel üzerine etkilediğinden daha fazla sıçrama olmaktadır.

Bu sorun, yeni geliştirilmiş olan ve GMAK yönteminin bir çeşidi olan soğuk metal transferli (cold metal transfer - CMT) GMAK-tabanlı WAAM yöntemi ile aşılmıştır. Bu CMT-GMAK tabanlı WAAM yöntemi kontrollü düşük transfer modu mekanizmasına dayanır; bu sayede mükemmel kalitede kaynak dolguları elde edilir, daha düşük ısı girdisi malzemeye aktarılır ve neredeyse hiç sıçrama olmaz [43]. Dolayısıyla, GMAK-tabanlı WAAM (özellikle de CMT-GMAK-tabanlı WAAM) yöntemi, telin (tüketilir elektrodun) kaynak torcu ile eş eksenli olması sayesinde takım yolunun daha kolay kontrol edilebilmesi nedeniyle, tüm tel ark eklemeli imalat işlemleri içerisinde en çok tercih edilen yöntemdir [9]. Ancak, CMT-GMAK tabanlı WAAM yöntemi Al-alaşımaları ve çelik malzemelerde iyi sonuç verirken, maalesef Ti-alaşımalarında işlem arkın istikrarsız olmasından olumsuz etkilenmekte ve yüzey pürüzlülüğü artmaktadır [44]. Bu nedenle, Ti-alaşımalarından eklemeli imalat ile üretiminde GTAK-tabanlı WAAM sistemi [45] veya PAK-tabanlı WAAM sistemi [46] tercih edilmektedir. An-



Şekil 7. Farklı Tel Ark Eklemeli İmalat İşlemlerinin Şematik Gösterimi: (a) GMAK-Tabanlı, (b) GTAK-Tabanlı ve (c) PAK-Tabanlı WAAM [24]

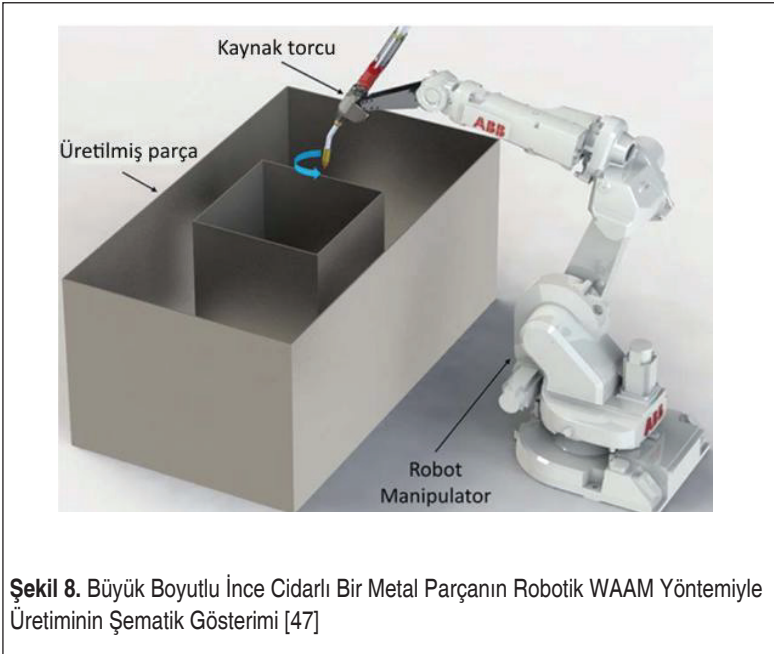
cak, bu işlemlerde dışarıdan harici tel harici olarak beslenmektedir. Bu nedenle istikrarlı biriktirme (dolgu) için tel her zaman aynı yönden beslenmelidir, bu da kaynak torcunun dönmesini gerektirir. Dolayısıyla, robotik WAAM uygulamalarında robotun programlanması diğer robotik uygulamalardan daha karmaşıktır [46].

3.2 Robotik Tel Ark Eklemeli İmalat Sistemleri

WAAM sistemlerinin çoğunda hareket mekanizması olarak eklemli bir endüstriyel robot kullanılmaktadır. Bu üretim sistemlerinde iki farklı sistem tasarımı mevcuttur. İlk tasarımda, işlem lazer toz yataklı eklemli imalat (Power-Bed Fusion - PBF) sistemlerinde olduğu gibi iyi bir inert gaz koruma ortamı sağlamak için kapalı bir odada gerçekleştirilir. İkinci tasarımda, mevcut veya özel olarak tasarlanmış lokal gaz koruma mekanizmaları ve toplam çalışma alanını artırmak için doğrusal bir ray üzerinde konumlandırılmış bir robot kullanılmaktadır. Bu sayede ikinci tasarım ile birkaç metre boyuta kadar çok büyük metal parçalar imal edebilmektedir. Şekil 8’de robotik

Tablo 1. Farklı WAAM Sistemlerinin Karşılaştırılması [22]

WAAM Sistemi	Isı Kaynağı	Özellikleri
GMAK-tabanlı	GMAK	Tüketilir tel elektrot; Tipik yığıma hızı: 3-4 kg/h; Düşük ark kararlılığı ve sıçrama
	CMT-GMAK	Tüketilir tel elektrot; Tipik yığıma hızı: 2-3 kg/h; Düşük ısı girdisi, sıfır sıçrama ve yüksek işlem toleransı
	Tandem GMAK	2 adet tüketilir tel elektrot; Tipik yığıma hızı: 6-8 kg/h; Kolay karıştırma ile kompozisyon kontrolü yüksek, Bunun sonucu intermetalik parça üretimi mümkün
GTAK-tabanlı	GTAK	Tüketilmeyen elektrot, harici tel besleme; Tipik yığıma hızı: 1-2 kg/h; Tel ve torcun döndürülmesi gerekir
PAK-tabanlı	Plazma	Tüketilmeyen elektrot, harici tel besleme; Tipik yığıma hızı: 2-4 kg/h; Tel ve torcun döndürülmesi gerekir



WAAM yöntemiyle üretimin yönteminin şematik gösterimi verilmektedir [47].

WAAM ile bir parçanın imalatı üç ana adımı içerir. Bunlar: süreç planlama, yığma (biriktirme) ve ek işlemdir [22]. Belirli bir CAD modeli için, 3B dilimleme ve programlama yazılımı, yüksek geometrik hassasiyette hatasız parça imalatını amaçlayan yığma (biriktirme) işlemi için gerekli robot hareketlerini ve kaynak parametrelerini üretir [48-50]. Belirli bir malzemeden bir parçayı üretmek için kullanılan kaynak biriktirme (yığma veya dolgu) modeline bağlı olarak, 3B dilimleme ve programlama yazılımı, olası işlemden kaynaklanan kusurları önlemek için otomatik yol planlama ve süreç optimizasyonu sunar [22, 51,52]. İmalat sırasında, robot ve dış eksen, kaynak torcunun parçanın üst üste katmanlar şekilde oluşturması için gerekli hassas hareketi sağlar. Gelişmiş WAAM sistemleri, kaynak sinyallerini [53], biriktirilmiş dolgu geometrisini [54], metal transfer davranışını [55] ve pasolar arası sıcaklığı [56-58] ölçmek için çeşitli sensörlerle donatılabilir, bu sensörler de daha yüksek ürün kalitesi elde etmek için gerekli olan işlem esnasında izleme ve kontrolü sağlar. Bu husus, WAAM işlem performansını önemli ölçüde geliştirme potansiyeline sahip, şu anda ve gelecekteki araştırma ilgi alanıdır.

4. TEL ARK EKLEMELİ İMALAT İŞLEMLERİNDE KULLANILAN MALZEMELER

WAAM yöntemlerinde piyasada mevcut kaynak endüstrisi için üretilmiş teller kullanılmaktadır. Birçok alaşım teli imal edilmekte olup, bu teller makaralara (bobinlere) sarılmış olarak temin edilebilmektedir. Tel ark eklemeli imalatı en çok çalışılan malzemeler arasında Ti-alaşimleri, Ni-esaslı süperalaşım, Al-alaşimleri ve çelikler sayılabilir. Tablo 2’de WAAM işlemlerinde en yaygın kullanılan alaşım listelenmektedir. Bu bölümde, WAAM yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan malzemeler ile üretilen parçaların mikroyapıları ve mekanik özellikleri tartışılacaktır.

Tablo 2. WAAM İşlemlerinde En Yaygın Kullanılan Alaşım

Titanium	Süperalaşım	Al-alaşım	Diğer Metaller
Ti-6Al-4V	IN625 IN718	2xxx serisi alaşım 4xxx serisi alaşım 5xxx serisi alaşım	Mg-alaşımı (AZ31) Fe-Al intermetalik Al/Ti bileşikler Çelik-nikel Çelik-bronz



4.1 Titanyum Alaşımları

Genel olarak geleneksel eksiltmeli imalat yöntemi ile üretilen parçalara alternatif olarak WAAM ile imal edilmiş daha kaliteli ve düşük maliyetli parçalara olan talep artarak devam etmektedir. Özellikle WAAM yöntemi karmaşık yapıda büyük Ti-parçaların üretimi için potansiyel sunmaktadır. Ti-alaşımları yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve yüksek maliyetleri nedeniyle daha ziyade yaygın olarak havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan parçaların imalatında kullanılmaktadır [59-61]. Dolayısıyla, bu parçaların katmanlı imalat ile üretilmesi de çok yaygın olarak çalışılmıştır [2,12,15,45,46,62-72].

Metal parçaların içyapılarının imalat esnasında maruz kaldığı ısı işlem geçmişine bağlı olduğu bilinmektedir. WAAM işlemlerinde parçanın maruz kaldığı karakteristik ısı çevrim tekrarlanan ısıtma ve soğutma işlemlerini kapsamaktadır [62,63]. Bunun sonucu üretilen parçada yarı-kararlı içyapılar ve heterojen kimyasal kompozisyonlar oluşmaktadır [73]. Örneğin, Baufeld ve ark. [63] GTAK-tabanlı WAAM ile üretilmiş Ti-6Al-4V (Ti64) parçanın içyapısını incelemiş ve eklenen tabakanın üst ve alt kısımlarında iki farklı içyapı bölgesi tespit etmişlerdir. Alternatif bantların yığılma yönüne dik olduğu alt bölgede, α fazı lamelleri içeren bir Widmanstätten yapısı gözlenmiştir. Diğer taraftan, bantların görülmediği üst bölgede ise başlıca iğnemi çökeltilerden oluşan bir mikro-yapı söz konusudur. PAK-tabanlı WAAM işlemi ile üretilen parçalarda da benzer içyapıların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu kapsamda, Lin ve ark. [64,65] yığılma yönü boyunca alttan üste doğru martenzitik yapı, Widmanstätten yapısı ve sepet örgüsü görümlü içyapıdan oluşan kademeli bir mikro yapı olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca, WAAM ile üretilen titanyum alaşımı parçalarda yaygın olarak görülen termal gradyan [74] nedeniyle, yığılma yönü boyunca farklı doğrultularda epitaksiyal olarak büyümüş β taneleri de gözlemlenmiştir.

WAAM yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4-V numunelerinin akma ve çekme dayanımları ASTM standardında tanımlanmış dövme Ti-6A-4V parçalara yakın ve döküm Ti-6Al-4V parçalardan daha iyidir [22]. İlâveten, Wang ve ark. [45] WAAM ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların ortalama yorulma ömrünün dövme parçalarından biraz daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. Ancak, WAAM ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçalar, anizotropik özellikler göstermektedir. Alfa lamellerinin tane boyutu ve uzun beta tanelerinin yönelmesi nedeniyle yığılma yönüne (deposition direction) nazaran ekleme yönünde (building direction) mukavemet daha düşük ve süneklik daha yüksektir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, dikey bir yük uygulayarak yığılan tabakayı plastik olarak deforme etmek için tabakalar arası haddeleme işlemi uygulanabilir [15,75,76]. Bu haddeleme işlemi, plastik deformasyon oluşturmak ve böylece yığılmış tabakada yeniden kristalleşme elde etmek için bir merdane ile 100 kN'a kadar bir yük uygulanmasından ibarettir. Dolayısıyla, bu haddeleme ile içyapıda tane rafinasyonu ve bunun sonucunda da parçada izotropik mekanik özellikler elde edilir [15,77,78]. Ek olarak,

tabakalar arası haddeleme işlemi ile WAAM ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçalarda kalıntı gerilmeler ve distorsiyon (çarpılma) da azaltılmaktadır [79,80].

4.2 Alüminyum Alaşımları ve Çelikler

Al-Cu (2xxx), Al-Si (4xxx) ve Al-Mg (5xxx) alaşımları dâhil birçok farklı alüminyum alaşım serisi için WAAM yöntemiyle üretim denemeleri başarıyla yürütülmesine rağmen [23,55,75,81-90], WAAM'ın Al-alaşımları ile ilgili ticari değeri esas olarak büyük ve karmaşık geometriye ince cidarlı yapılarla sınırlıdır. Bunun başlıca nedeni, küçük ve basit şekilli alüminyum alaşımı parçaların geleneksel eksiltmeli işlemlerle üretilmesinin maliyetinin düşük olmasıdır [83]. Ayrıca, geleneksel ergitme kaynakları ile Al-alaşımlarının birleştirme işlemlerinde karşılaşılan muhtelif problemler [91-96] son 30 yılda geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile giderilmiştir [97-111]. Al-alaşımı parçaların düşük maliyette üretilmelerini mümkün kılan bu yeni birleştirme teknikleri dâhil muhtelif üretim işlemlerinin var olması da WAAM yönteminin Al-alaşımlarında kullanılmasını sınırlayan bir başka husustur. WAAM'ın alüminyum alaşımlarındaki sınırlı ticari uygulamasının bir başka nedeni, 7xxx ve 6xxx serisi gibi bazı alüminyum alaşımları serilerinin, eklemeli işlem sırasında sıklıkla meydana gelen türbülanslı eriyik havuzu ve porozite gibi kaynak kusurları nedeniyle kaynak yapılmasının zor olması nedeniyle WAAM ile imalatının güç olmasıdır. Nitekim WAAM ile üretilen Al-alaşımı parçaların mekanik özellikleri porozite oluşumu nedeniyle düşmektedir [84].

Benzer şekilde WAAM yönteminin, en çok kullanılan mühendislik malzemesi olan çeliklerden [112] parça imalatında, kullanımı da yaygın değildir [22]. Bunun iki nedeni vardır. Bunlar: 1) geleneksel eksiltmeli (talaşlı) imalat işlemler ile küçük ve basit çelik parçaların üretim maliyeti düşük olması ve 2) çelik parçaların düşük maliyetle üretilmesi için çeşitli çok iyi bilinen kaynak teknikleri dâhil olmak üzere birçok üretim yönteminin mevcut olmasıdır. Bu bağlamda, Al-alaşımlarında ticari olarak kullanılan SKK da benzer nedenlerden ve ayrıca karıştırıcı uç aşınması gibi diğer sorunlardan dolayı çeliklerin kaynağında kullanılma potansiyeline karşın ticarileşmemiştir [113-117]. Yine de, özellikle paslanmaz çelikler gibi bazı çelik teller kullanılarak tel ark eklemeli imalat le parça üretimi üzerine çalışmalar yürütülmüştür [118-126].

Genel olarak, eklemeli imalat ile imal edilen alüminyum alaşımlı parçalar, kütük malzemenin talaşlı imalat ile işlenenlere kıyasla daha düşük mekanik özelliklere sahiptir [87]. Daha yüksek çekme mukavemeti elde etmek için, eklemeli imalat ile üretilmiş alüminyum parçaların çoğu sıklıkla, mikro yapıyı iyileştirmek (tane rafinasyonu elde etmek) için işlem sonrası ısıtılma tabakalar arası yüksek basınçlı haddeleme işleminin WAAM ile üretilmiş Al-alaşımı parçalarda da kalıntı gerilme ve çarpılmayı azalttığı rapor edilmiştir [87,88]. Bu işlem ile, aynı zamanda WAAM ile üretilmiş



Al-alaşımı parçalarda oluşan porozite de azaltılabilir veya giderilebilir. Nitekim Gu ve ark. [81,86] WAAM ile üretilmiş Al-alaşımı parçaların mekanik özelliklerinin tabakalar arası haddeleme ve WAAM ile üretim sonrası ısıtılma işlemi ile artırıldığını göstermişlerdir. Bu mukavemet artışının tabakalar arası haddelemede uygulanan basıncın artması ile arttığı da tespit edilmiştir. Ek olarak, WAAM ile üretilen parçalarda oluşan porozitenin kaliteli kaynak teli kullanımı ve çeşitli sinerjik çalışma modlarının birlikte kullanımı ile ortadan kaldırılabileceği de ileri sürülmüştür [84,85]. Bu kapsamda, özellikle düşük ısı girdili darbeli soğuk metal transferli (CMT) ark kaynağı sistemleri porozite açısından çok iyi sonuç vermektedir [43]. Porozitenin giderilmesi, daha düşük ısı girdisi sayesinde üretilen Al-alaşımı parçada daha ince eş eksenli tanelerin oluşumu ve yöntemde tel ile alt tabakadaki oksidin daha iyi temizlenmesidir [84].

4.3 Nikel Esaslı Süperalaşımalar

Ni-bazlı süperalaşımalar, Ti-alaşımından sonra katmanlı imalatı en fazla araştırılan ikinci malzemedir. Bu alaşımalar, 550 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda olağanüstü mukavemet ve oksidasyon direnci göstermeleri nedeniyle uzay ve havacılık, petrokimya, kimya ve denizcilik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [127,128]. Ancak, talaşlı imalat ile işlenmeleri kesici kenarlara yapışma ve mikro yapılarında aşındırıcı sert partiküllerin varlığı nedeniyle güç ve yüksek maliyetlidir. Dolayısıyla, WAAM yöntemi ile bu alaşımlardan parça imalatı malzeme israfını ve talaşlı imalat ilgili yüksek maliyeti düşürme potansiyeline sahip çok uygun bir teknik olarak kabul edilmektedir. Bunun sonucu, Inconel 718 ve Inconel 625 alaşımı gibi Ni-esaslı süper alaşımların WAAM ile üretilmeleri ve imal edilen parçaların özelliklerinin belirlenmesine yönelik çok sayıda çalışma yürütülmüştür [58,129-136].

GTAK-tabanlı WAAM yöntemiyle üretilmiş Inconel 718 parçalarının mikro yapısı, genellikle dendritler arası sınırlarda küçük Laves fazı çökeltileri ve MC karbürler içeren büyük sütunlu (havuç şekilli) tanelerden oluşmaktadır [133]. Benzer şekilde, Xu ve ark. [134] WAAM yöntemiyle üretilmiş Inconel 625 parçalarının mikro yapısının da, çok miktarda Laves fazı, MC karbürler ve Ni₃Nb partikülleri ile dekore edilmiş büyük sütunlu tanelerden oluştuğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca, WAAM ile imalat sonrası ısıtılma işlemi ile iç yapının interdendritik bölgelerde daha küçük dendritik kol aralığı, daha az niyobyum segregasyonu ve daha az miktarda süreksiz Laves fazı içeren daha ince taneli hale geldiği gözlenmiştir. Aynı zamanda, bu ısıtılma işlemi tane rafinasyonu sağladığından mekanik özellikleri de iyileştirmektedir.

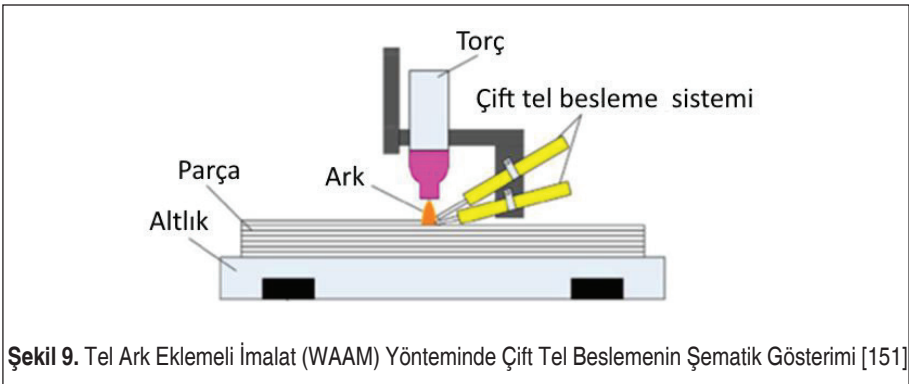
Baufeld ve ark. [133] GTAK-tabanlı tel ark eklemeli imalat ile elde edilen 718 parçanın mekanik özelliklerini de incelemiş ve sonuçları lazer ve elektron ışını ile tel ergitmeli eklemeli imalat ile üretilmiş parçaların özellikleri ile karşılaştırmıştır. Ark eklemeli imalat ile üretilen parçanın akma ve çekme mukavemetleri sırasıyla yaklaşık 473 MPa ve 828 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu mukavemet değerleri döküm

parçaların mukavemetine göre çok iyi, fakat hem dövme parçalardan ve lazer veya elektron ışını ile tel eklemeli imalat ile üretilen parçalardan daha düşüktür. Benzer şekilde, WAAM ile imal edilmiş Inconel 625 parçaların akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sünekliliği döküm parçalardan daha iyi, fakat dövme parçalardan biraz düşüktür [129,136].

4.4 Diğer Metaller

WAAM yöntemi ile potansiyel parça üretimi için diğer metaller de araştırılmıştır [137-147]. Bunlar arasında, AZ31 ve AZ91 gibi Mg-alaşımı otomotiv parçalarının imalatı [137,138], denizcilik uygulamaları için NiAl bronz (NAB alaşımı) parçaların üretimi [139,140], Fe-Al metallere (intermetalik) bileşikler [141,142] ve Ti-Al metallere bileşiklerin [143-146] yanı sıra havacılık endüstrisi için bimetalik çelik / nikel [147] ve çelik / bronz [148] parçaların üretimi sayılabilir. Fakat bu araştırmanın çoğu, fonksiyonel parçaları WAAM yöntemiyle imal etmek için bir süreç geliştirmek yerine, basit düz duvarlı yapılardan alınan örneklerin içyapı ve mekanik özelliklerini belirlemeye odaklanmıştır. Ayrıca, önceden belirlenmiş kimyasal kompozisyona eşdeğer kimyasala sahip metallere parçaların WAAM yöntemiyle üretiminde hala aşılması gereken zorluklar vardır.

WAAM yöntemi en az bir yönde kademeli olarak değişen özellikler (fiziksel, mekanik, biyokimyasal, vb.) sergileyen gelişmiş bir heterojen malzeme sınıfı olan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (functionally graded materials - FGM) üretimi için de uygun bir adaydır [142,149]. Ayrıca, WAAM tekniği ile belirli bölgelerinde farklı özelliklere sahip malzemelerin üretimi de mümkündür [149,150]. İki yaklaşım kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin WAAM ile geliştirilmesi sağlanabilir. Bu yaklaşımlar: (i) tel besleme hızı veya akımı gibi işlem parametrelerinin değiştirilmesi ve (ii) Şekil 9'da şematik olarak gösterildiği gibi, birden fazla tel beslenmesidir [151].



Şekil 9. Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM) Yönteminde Çift Tel Beslemenin Şematik Gösterimi [151]



5. WAAM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARDA KARŞILAŞILAN PROBLEMLER

WAAM ile üretilen parçaların mekanik özellikleri çoğu durumda geleneksel olarak işlenen muadilleriyle karşılaştırılabilir düzeydedir. Ancak, WAAM ile üretilen parçalarda kritik uygulamalar için dikkat edilmesi gereken bazı kusurlar oluşabilmektedir. Özellikle bu kusurların yüksek sıcaklıkta yorulma gibi hasarlara yol açtığı zorlu şartlara maruz kalan parçalarda yüksek kalıntı gerilme seviyeleri, porozite ve çatlak oluşumundan kaçınılmalıdır. WAAM ile üretilen parçalarda bu kusurlar, kötü programlama stratejisi, yetersiz parametre ayarından kaynaklanan dengesiz kaynak havuzu, yüksek ısı girdisinden oluşan çarpılma [152], gaz kirliliği gibi çevresel etkiler ve diğer makine arızaları gibi çeşitli nedenlerden dolayı ortaya çıkabilir. WAAM ile üretilmiş her farklı malzemeden parçada o malzemeye özgü kusurlar oluşmaktadır. Örneğin, tipik olarak Al-alaşımalarında porozite oluşumu, Ti-alaşımalarında aşırı oksitlenme, çeliklerde yüzey aşırı pürüzlülüğü ve iki farklı metalden oluşan parçalarda aşırı distorsiyon ve çatlak oluşumu gözlenmektedir. Bu bölümde bu kusurlar fazla detaya girmeden kısaca tartışılacaktır.

5.1 Kalıntı Gerilme ve Distorsiyon

Diğer eklemeli imalat işlemlerinde olduğu gibi, kalıntı (artık) gerilme ve distorsiyon (çarpılma) ısı bir işlem olan WAAM yönteminin de doğasında vardır ve bu hataların oluşumunun tamamen önlenmesi mümkün değildir. Kalıntı gerilme, üretilen parçada çarpılmaya, geometrik tolerans kaybına ve yığıma sırasında katmanların ayrılmasının yanı sıra eklemeli imalat ile üretilen parçaların yorulma performansının ve kırılma direncinin düşmesine yol açabilir. Bu nedenle, artık gerilmenin ve distorsiyonun kontrolü ve en aza indirilmesi önemli olup, bu konuda çalışmalara gereksinim vardır.

WAAM ile üretilmiş parçalarda boylamasına ve enine büzülme, bükülme distorsiyonu, açılma distorsiyonu ve burulma distorsiyonu dahil olmak üzere çeşitli distorsiyon türleri gözlenmiştir [153]. Distorsiyon, tekrarlanan ergitme ve soğutma işlemleri esnasında parçanın ısı genleşmesi ve büzülmesinden dolayı özellikle de büyük boyutlu ve ince cidarlı parçalarda oluşur [76]. Kalıntı gerilmeler ise, WAAM ile üretilen parçalarda ergime ve soğuma esnasında parçanın genleşme ve büzülmesi sonucu oluşur. Eğer üretilen parçada kalıntı gerilmeler yeterince yüksekse, parçanın mekanik özelliklerini ve yorulma performansı önemli oranda olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, kalıntı gerilme malzemenin lokal çekme mukavemetini aşarsa, çatlama oluşur. Diğer taraftan, eğer kalıntı gerilme lokal akma dayanımından yüksek fakat çekme mukavemetinden düşükse distorsiyon oluşmaktadır [154]. WAAM yöntemiyle imalat işlemindeki yol planlaması da kalıntı gerilme ve distorsiyon oluşumuna yol açmaktadır [22,155]. Uygun yığıma yolu tasarımları kullanımı ile özellikle büyük parçaların imalatında, bu kusurlar önemli oranda önlenmektedir.

Tüm WAAM mühendislik malzemeleri arasında, farklı iki metalden üretilen parçalarda, malzemelerin farklı ısı genleşme katsayısı nedeniyle en yüksek kalıntı gerilme ve distorsiyon oluşmaktadır. Bu nedenle, farklı iki malzeme kullanılan WAAM işlemlerinde hassas pasolar arası sıcaklık kontrolü gerekmektedir. Diğer taraftan, Ni-esaslı süperalaşımlardan WAAM ile üretilen parçalarda nispeten daha düşük artık gerilmeler oluşmaktadır. Ancak, bu alaşımlarda oluşan artık gerilmeler genellikle akma geriliminden daha yüksek olduğu için katmanların ayrılması, burkulma ve çarpılma gibi işlem kusurları ile karşılaşılabilir [166]. Alüminyum alaşımları gibi nispeten daha yumuşak diğer malzemelerde, deformasyon kusurları daha düşük mertebededir.

Kalıntı gerilme ve distorsiyon oluşumu, kaynak akımı, kaynak gerilimi, tel besleme hızı, ortam sıcaklığı, koruyucu gaz akış hızı gibi birçok işlem parametresiyle ilişkilidir. Bu parametrelerin ideal seçimi veya manipülasyonu yoluyla kusurları kontrol etmek için kullanılacak sistematik yöntemler bulunmamaktadır. Fakat WAAM ile üretilmiş parçalarda oluşan artık gerilmeler ve distorsiyon parçaya uygulanan üretim sonrası ısıtma işlemleri ile etkili bir şekilde azaltılabilmektedir.

5.2 Porozite

WAAM ile imal edilmiş parçalarda, özellikle de Al-alaşımı parçalarda, yaygın olarak karşılaşılan bir diğer hata porozite (gözenek) oluşumudur [157]. Porozite mekanik özellikleri olumsuz etkilediğinden mümkün merteye azaltılması veya mümkünse tamamen önlenmesi gerekmektedir. Porozitenin varlığı, mikro çatlaklardan kaynaklanan hasar nedeniyle parçanın mukavemetini düşürür. Ayrıca, eklemeli imal edilmiş parçada farklı boyut ve şekil dağılımına yol açtığı için yorulma dayanımını da düşürür. Genel olarak, porozite oluşumu hammaddeye bağlı [158] veya işlemde kaynaklanan olarak [159] sınıflandırılır.

WAAM hammaddesi olan tel genellikle bir dereceye kadar, tamamen giderilmesi güç olan nem, gres yağı ve diğer hidrokarbon bileşikleri gibi yüzey kirliliğine sahiptir. Bu maddeler ergiyik havuza kolaylıkla girebilir ve katılma sonrası parçada porozite oluşumuna yol açarlar. Yaygın mühendislik malzemeleri arasında bu kusurun oluşumuna en duyarlı olan, sıvı halde hidrojen çözünürlüğü katı haldekinden çok yüksek olması sebebiyle Al-alaşımlarıdır [160]. Hatta sıvı haldeki küçük miktarlarda çözülmüş hidrojen bile katılma sonrası çözünürlük sınırının aşılması sonucu gözenek oluşumuna neden olabilir [161]. Dolayısıyla, özellikle alüminyum alaşımları için hammadde temizliği çok kritiktir.

Diğer taraftan, işlem kaynaklı gözenekler genellikle küresel değildir ve temel olarak zayıf yol planlaması veya dengesiz yığılma nedeniyle oluşur. Yığılma yolu karmaşık olduğunda veya üretim süreci değiştirilebilir olduğunda, yetersiz ergime veya sıçrama ile karşılaşılabılır ve bu da etkilenen bölgelerde boşluklar oluşturur.



Gözenek oluşumunu kontrol etmek için muhtelif önlemler alınabilir. Bunlar:

1. Özellikle alüminyum için GMAK-tabanlı (AA) bir imalat işlemi veya kontrollü kısa devreli soğuk metal transferli (CMT) GMAK yöntemi (CMT-PADV) tabanlı bir işlem tercih edilir.
2. En yüksek kalitede koruyucu gaz, sıkı gaz contaları, organik olmayan borular ve kısa boru uzunlukları kullanılmalıdır.
3. Tel ve altlık yüzeyleri işlem öncesi olabildiğince temizlenmelidir.
4. Yüksek kaliteli hammadde (tel) kullanılmalıdır.
5. Yığılan damlanın şeklinin optimize edilmesi gerekir.
6. İşlem sırasında ısıl profil izlenmeli ve kontrol edilmelidir.
7. Yığma sonrası her tabakanın haddelenmesi (tabakalar arası haddeleme işlemi) uygulanabilir.

Örneğin, bu önlemlerden pasolar arası haddeleme, WAAM ile üretilmiş Al-alaşımı parçalarda porozite boyutu ve miktarı azaltır ve bu sayede sünekliği artırır [162]. Bu soğuk haddeleme işlemi aynı zamanda ürünün yüzey kalitesini de artırır [163].

5.3 Çatlak ve Delaminasyon (Katmanların Ayrılması)

Artık gerilme ve distorsiyona benzer şekilde, çatlama ve katmanların (tabakaların) ayrılması hatalarının oluşumuna sadece imalat işleminde malzemenin maruz kaldığı ısı girdisi değil, aynı zamanda yığılan malzemenin özellikleri de yol açmaktadır. WAAM ile imal edilen parçalarda karşılaşılan çatlama, genel olarak sıcak çatlama da denilen katılma çatlağı veya tane sınırı çatlağı olarak sınıflandırılmaktadır [164]. İlk çatlak türü, esas olarak malzemenin katılma doğasına bağlıdır ve genellikle katılmış tane akışının engellenmesi veya ergiyik havuzundaki yüksek gerilmelerden kaynaklanır. Tane sınırı çatlama ise, genellikle düşük ergime dereceli fazların oluşumu nedeniyle tane sınırları boyunca oluşur.

Delaminasyon ise, tabakalar arasında yetersiz ergime veya alttaki katı katmanın yetersiz tekrar ergimesi nedeniyle gerçekleşir. Genellikle bu kusur göz ile rahatlıkla gözlemlenebilir ve imalat sonrası işlemler ile giderilemez. Bu hatayı önlemek için, alt tabaka bir sonraki tabaka yığılmadan önce ön ısıtmaya tabi tutulmalıdır.

Özellikle Al/Cu, Al/Ti ve Al/Fe gibi farklı malzeme kombinasyonları, WAAM yöntemiyle üretimde çatlama ve delaminasyona karşı oldukça duyarlıdır. Farklı metallerin karşılıklı çözünürlüklerinde ve kimyasal tepkimelerinde büyük farklılıklar olduğunda, metaller arası faz dengesi kolaylıkla bozulur, bu da tane sınırları boyunca çatlak büyümesine neden olur. Hatta Ni-esaslı alaşımlarda, en son katılma bölgelerinde sıvı filmin varlığından dolayı kolayca katılma çatlama oluşur [165]. Dolayısıyla, hem Ni-esaslı alaşımlarda hem de farklı malzeme kombinasyonlarında çatlama ve dela-

minasyondan kaçınmak için özellikle dikkat edilmelidir. Çatlama kusurlarını kontrol etmek için şu önlemler alınabilir: (1) Karışım (alaşım) telleri kullanılmalı ve bileşimleri optimize edilmeli, (2) Yığıma işlemi sırasında soğutma hızı düşürülmeli ve (3) mümkünse katmanlar arası ön ısıtma yapılmalıdır.

6. GENEL DEĞERLENDİRMELER

Metal eklemeli imalat işlemlerinden biri olan tel ark yöntemi üretilen parçaların özellikleri önemli oranda malzemeye, kullanılan kaynak işlemine ve işlem parametrelerinin kontrolüne bağlıdır. Dolayısıyla, kaliteli bir parça üretimi için çeşitli malzemelerin derinlemesine anlaşılması, ideal süreç tasarımı, işlem esansında parametre kontrolü ve üretim sonrası işlem süreçleri oldukça önemlidir. Tel ark eklemeli imalat işlemleri aşağıdaki avantajları sunmaktadır:

- Ark kaynağı yöntemlerinin birçoğu bu imalat işleminde kullanılabilir.
- Malzeme firesi düşük olan ve düşük maliyetli bir imalat yöntemidir.
- Birçok farklı metal türünden muhtelif karmaşık şekilli parçalar imal edilebilir,
- Birden fazla benzer veya farklı ilave tel beslenerek yığıma oranı artırılabilir,
- Özellikle ark yöntemleri ve çoklu tel besleme ile elde edilen yüksek yığıma kapasitesi sayesinde orta ve büyük boyutlu parçaların imalatı mümkündür,
- Yöntem farklı teller kullanılarak metallerarası bileşik parçalar ve fonksiyonel dercelendirilmiş parçalar üretme potansiyeli sunmaktadır.
- Parça tamirinde, özellikle de bölgesel tamir işlerinde, de kullanılma potansiyeli vardır.

Ancak, WAAM işlemi, doğası gereği katmanlar arasındaki ısı farklılık ve tekrarlanan ısıtma-soğutma nedeniyle dengesiz bir ısıl prosestir. Bu yüzden, eklemeli olarak imal edilen parçada, bölgesel mekanik özellik değişimlerine (anizotropik özelliklere) yol açan, işlem sonrası oluşacak içyapıyı tahmin etmek ve kontrol etmek güçtür. Dolayısıyla, WAAM yöntemiyle imal edilmiş ürünlerde, işlenen malzeme özellikleri ve işlem parametrelerine bağlı olarak bazı kusurlarla karşılaşmaktadır. Son yıllarda, yığıma kusurlarının ortadan kaldırılması veya azaltılması sonucu yüksek kaliteli ve mekanik performansa sahip parçaların üretilmesi ve bu sayede WAAM yöntemini diğer katmanlı üretim yöntemlerine karşı daha rekabetçi hale getirmek ana araştırma konusudur. Bu konudaki gelişmeler WAAM teknolojisinin gelecek yıllarda geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlayacaktır.

WAAM yöntemiyle üretilen parçalarda hata oluşumunu giderecek müdahaleler önem arz etmektedir. Bunlardan ilki, belirli bir malzeme için işlem kararlılığını artırmak ve üretilen parçada oluşan hataları azaltmak için en uygun WAAM işleminin seçilmesidir. Örneğin, Al-alaşımından eklemeli imalat ile parçalar üretmek için darbeli



gelişmiş CMT yöntemi (pulse advanced CMT process) kullanılırsa, parçada oluşan porozite miktarı diğer GMAK-tabanlı işlemlere nazaran önemli ölçüde daha düşüktür. Ayrıca, işlem kararlılığını korumak ve üretim kalitesini artırmak için sisteme entegre ve güvenilir süreç izleme ve kontrol sistemlerine ihtiyaç vardır. Genellikle, süreç izleme ve kontrol sistemine yığılma geometrisi, pasolar arası sıcaklık, ark özellikleri ve metal transfer davranışı dahil edilir. Pasolar arası sıcaklığın makul bir aralık içinde kontrol edilmesi ile, istenilen mikroyapılar elde edilebilir ve dolayısıyla mekanik özellikler artırılabilir. Ayrıca, ark özelliklerinin ve metal transfer davranışının gerçek zamanlı olarak düzenlenmesi, proses stabilitesine ve kusurların önlenmesine yardımcı olur. İlave olarak, işlem esnasında izleme yöntemlerinin geliştirilmesi, parçada oluşan herhangi bir kusurun sadece parçanın üretimi sonrasında değil, hata oluştuğundan hemen sonra (son tabakanın bitiminde) onarılmasını da mümkün kılar. Bu nedenle, işlem esnasında izleme ve kontrol, önemli malzeme tasarrufu ve daha kısa üretim süreleri sağlayabilir.

WAAM ile üretilen parçalarda oluşan hataları azaltmak için alınabilecek önlemlerden bir diğeri katmanlar arasında soğuk haddelemedir. Pasolar arası soğuk haddeleme, WAAM ile imal edilen parçada oluşan kalıntı gerilmeleri ve distorsiyonu azaltmaktadır. Pasolar arası soğuk haddeleme yalnızca artık gerilmeleri ve distorsiyonu azaltmakla kalmaz, aynı zamanda plastik deformasyon sayesinde malzeme özelliklerini daha homojen hale de getirir, diğer bir deyişle anizotropiyi de giderir. Bunlara ek olarak, pasolar arası soğuk haddeleme ile WAAM ile imal edilmiş alüminyum parçalardaki porozite miktarı azaltılabilir veya tamamen giderilebilir. Fakat bu teknik, haddeleme işleminin geometrik sınırlaması nedeniyle, yalnızca düz duvarlar gibi basit şekilli parçalar için uygundur.

WAAM ile üretilen parçaların içyapısını ve mekanik özelliklerini geliştirmek için yararlanılabilecek bir başka yaklaşım pasolar arası soğutmadır. Pasolar arası soğutma, her katmanın yığılması esnasında ve/veya sonrasında imal edilen parça üzerinde hızlı soğutma sağlayan hareketli bir gaz nozulu ile uygulanabilir. Bu tür bir hızlı soğutma kullanılarak, işlem esnasında katman sıcaklığı ve ısı döngüsü, istenilen mikro yapı ve mekanik özellikleri elde edecek şekilde kontrol edilebilir. Bu tekniğin ayrıca potansiyel olarak artık gerilmeleri ve distorsiyonu azaltma potansiyeli de bulunmasına karşın bu konu henüz yeterince araştırılmamıştır.

Ayrıca, çoğu malzemeden WAAM ile üretilen parçalar mekanik özellikleri iyileştirmek için üretim sonrası ısı sonrası işlem gerektirir. Bu ısı sonrası işlem parçanın özelliklerini iyileştirmek yanında, yüzey pürüzlülüğünü ve poroziteyi azaltır ve artık gerilmeler ile distorsiyonu giderir. İmalat sonrası ısı sonrası işlemin uygun şekilde yapılmasıyla, yığılma kalitesini etkileyen sorunların çoğu hafifletilebilir veya ortadan kaldırılabilir. Hâlihazırda, parça kalitesini artıran birkaç ısı sonrası işlem bulunmaktadır. Ancak, üretim sonrası ısı sonrası işlemlerin bazı kısıtlamaları vardır; örneğin, yüzeye bilye püskürtme ve

ultrasonik darbe işlemi yalnızca parça yüzeyine yakın kusurları azaltır ve sadece parçanın bu kısmında malzeme özelliğini iyileştirir. Ayrıca, bazı malzemelerde uzun süreli ısıtma işlemi, tane inceltme yerine tane büyümesine yol açabilir. Dolayısıyla, uygun bir ısıtma işlemi süreci seçimi, malzemeye, kullanılan eklemeli üretim yöntemine, çalışma sıcaklığına ve ısıtma işlemi koşullarına bağlıdır. Genelde, eklemeli imalat sonrası ısıtma işlemi, özellikle Al-alaşım ve Ni- esaslı alaşımlarda önemli oranda tane rafinasyonu sağlar ve bu sayede mukavemet önemli düzeyde artırılır.

WAAM yöntemi, ticari bir imalat işlemi olmaya ve uzay-havacılık alanında kullanılan birçok parçanın kütük veya dövülmüş ara ürünlerden üretiminde kullanılan mevcut imalat işlemlerinin yerini almaya aday bir teknolojidir. Ancak, piyasada bir tel ark eklemeli imalat platformunun mevcut olmaması, bu teknolojinin yaygın endüstriyel kullanımını sınırlamaktadır. Hâlihazırda bu yöntem ile parçaları otomatik olarak üretebilen CAD ve imalat yazılımları geliştirmek için çalışmalar yapılmaktadır. Fakat metal parçaların imali için ticari olarak temin edilebilen bir WAAM sisteminin geliştirilmesi, fiziksel kaynak yöntemi geliştirme, malzeme bilimi ve termo-mekanik mühendisliği ile mekatronik ve kontrol sistemi tasarımı kapsayan çok disiplinli bir konu olduğundan güçtür. Son yıllarda işlem planlama, programlama ve malzeme çalışması gibi çeşitli alanlarda çok sayıda araştırma yapılmış olmasına rağmen, piyasada mevcut toz yataklı ergitme sistemlerine benzer genel amaçlı bir WAAM sistemi henüz geliştirilememiştir. Ayrıca, farklı mühendislik malzemeleri için farklı gereksinimlerin olması ve değişken imalat ölçeği nedeniyle birçok farklı WAAM sisteminin geliştirilmesi de gerekmektedir.

Tel ark eklemeli imalatın daha yaygın kullanımını sağlayacak bir başka husus şudur. Bu imalat yöntemi ile üretilen parçalarda optimum içyapı ve dolayısıyla yüksek mekanik özellikler yeni tel kompozisyon tasarımı ile optimize edilebilir. Farklı alaşım elementlerinin malzeme özellikleri üzerinde belirli etkilerinin olduğu iyi bilinmektedir. Faz diyagramı dikkate alınarak, istenilen içyapıları oluşturmak için işlemde kullanılacak tele özel alaşım elementleri eklenir ve bu sayede mekanik özellikler iyileştirilebilir. Ayrıca, yöntemde mevcut tel karıştırma imkânı sayesinde, özel uygulamalar için büyük boyutlu fonksiyonel derecelendirilmiş ürünler üretme potansiyeli de bulunmaktadır. Örneğin, metaller arası fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler üretmek için çift tel beslemeli GTAK-tabanlı WAAM yöntemi kullanılabilir. Ayrıca, yeni özlü tellerin geliştirilmesinin de istenilen kimyasal kompozisyona sahip parçaların tel ark eklemeli imalat ile üretilmesi mümkün kılacağı düşünülmektedir. Özetle bu alanda sağlanacak gelişmeler yöntemin endüstriyel uygulamasını daha yaygın hale getirecektir.

Son olarak, henüz tam olarak araştırılmamış olmakla beraber, bu teknolojinin hasarlı parçaların tamir işlemlerinde kullanılma potansiyeli de bulunmaktadır. WAAM teknolojisi ile lokal (bölgesel) tamir işlemi yapmak mümkündür. Dolayısıyla, hasarlı bir parçanın WAAM ile tamiri sayesinde hasarlı parçanın tamamen değiştirilmesi ile alaka maliyetler de büyük ölçüde azaltılabilir.



KAYNAKÇA

1. **Tino et al., R.** 2020. "Additive manufacturing in radiation oncology: A review of clinical practice, emerging trends and research opportunities", *Int. J. Extrem. Manuf.*, vol. 2, 012003.
2. **Baufeld, B., Biest, O.V.D., Gault, R.** 2010. "Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties", *Mater. Des.*, vol. 31, pp. s106-s111.
3. **Han, Y., Lu, W., Jarvis, T., et al.** 2015. "Investigation on the microstructure of direct laser additive manufactured Ti6Al4V alloy", *Materials Research*, vol. 18, pp. 24-28.
4. **Gu, D., Guo, M., Zhang, H., et al.** 2020. "Effects of laser scanning strategies on selective laser melting of pure tungsten", *Int. J. Extrem. Manuf.*, vol. 2, 025001.
5. **Spencer, J., Dickens, P., Wykes, C.** 1998. "Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf.*, vol. 212, pp. 175-182.
6. **Zhang, Y., Chen, Y., Li, P., Male, A.T.** 2003. "Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 135, pp. 347-357.
7. **Kwak, Y.M., Doumanidis, C.C.** 2002. "Geometry regulation of material deposition in near-net shape manufacturing by thermally scanned welding", *J. Manuf. Process.*, vol. 4, pp. 28-41.
8. **Wang, Y., Chen, X., Konovalov, S.V.** 2017. "Additive manufacturing based on welding arc: A low-cost method", *J. Surf. Invest.*, vol. 11, pp. 1317-1328.
9. **Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., et al.** 2016. "Wire + arc additive manufacturing", *Mater. Sci. Technol.*, vol. 32 (7), pp. 641-647.
10. **Guo, Y., Pan, H., Ren, L., Quan, G.** 2019. "Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured AZ80M magnesium alloy", *Mater. Lett.*, vol. 247, pp. 4-6.
11. **Wang, Y., Konovalov, S., Chen, X., et al.** 2021. "Research on Cu-6.6%Al-3.2%Si alloy by dual wire arc additive manufacturing", *JMEPEG*, vol. 30, pp. 1694-1702.
12. **Martina, F., Mehnen, J., Williams, S.W., et al.** 2012. "Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, pp. 1377-1386.
13. **Ding, D., Shen, C., Pan, Z., et al.** 2016. "Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished Part, CAD Comput. Aided Des.", vol. 73, pp. 66-75.
14. **Frazier, W.E.** 2014. "Metal additive manufacturing: a review", *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, pp. 1917-1928.
15. **Martina, F., Colegrove, P.A., Williams, S.W., Meyer, J.** 2015. "Microstructure of interpass rolled wire + arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components", *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 46, pp. 6103-6118.



16. **Önal, A.** 2017. “WAAM işleminde soğuk metal transferi (CMT) teknolojisinin kullanımı”, X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 17-18 Kasım 2017, Ankara, S. 1-10.
17. **Rosli, N.A., Alkahari, M.R., bin Abdollah, M.F., et al.** 2021. “Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process”, J Mater Res & Technol, vol. 11, pp. 2127-2145.
18. **Dhinakaran, V., Ajith, J., Fathima Yasin Fahmidha, A., et al.** 2020. “Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process of nickel based superalloys – A review”, Materials Today: Proceedings, vol. 21, pp. 920-925.
19. **Xia, C., Pan, Z., Polden, J., et al.** 2020. “A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system”, Journal of Manufacturing Systems, vol. 57, pp. 31-45.
20. **Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., et al.** 2019. “Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)”, Materials, vol. 12, 1121.
21. **Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., et al.** 2018. “Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review”, Journal of Materials Engineering and Performance (JMEPEG), vol. 27, pp. 1-13.
22. **Wu, B., Pan, Z., Ding, D., et al.** 2018. “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement”, J Manuf Process, vol. 35, pp. 127-139.
23. **Derekar, K.S.** 2018. “A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium”, Mater Sci Technol, vol. 34 (8), pp. 895-916.
24. **Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H.J.** 2015. “Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests”, Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 81, pp. 465-481.
25. **Çam G.** 2022. “Prospects of producing aluminum parts by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)”, Materials Today: Proceedings, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.137>
26. **Simchi, A., Petzoldt, F., Pohl, H.** 2003. “On the development of direct laser sintering for rapid tooling”, J Mater Process Technol, vol. 141 (3), pp. 319-328.
27. **Heinl, P., Müller, L., Körner, C., et al.** 2008. “Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting”, Acta Biomater, vol. 4 (5), pp. 1536-1544.
28. **Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H., Barlow, J.** 1995. “Direct selective laser sintering of metals”, Rapid Prototyp J, vol. 1 (1), pp. 26-36.
29. **Kruth, J.P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., et al.** 2004. “Selective laser melting of iron-based powder”, J Mater Process Technol, vol. 149 (1-3), pp. 616-622.
30. **Furumoto, T., et al.** 2009. “Study on laser consolidation of metal powder with Yb: fiber laser-evaluation of line consolidation structure”, J Mater Process Technol, vol. 209, pp. 5973-5980.



31. **Milewski, J.O., Lewis, G., Thoma, D.** 1998. "Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition". *J Mater Process Technol*, vol. 75, pp. 165-172.
32. **Levy, G.N., Schindel, R., Kruth, J.P.** 2003. "Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives", *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 52, pp. 589-609.
33. **Lewandowski, J.J., Seifi, M.** 2016. "Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties", *Annu Rev Mater Res*, vol. 46, pp. 151-186.
34. **Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., et al.** 2015. "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering", *Comput Des*, vol. 69, pp. 65-89.
35. **Unocic, R., et al.** 2004. "Process efficiency measurements in the laser engineered net shaping process", *Metall Mater Trans B*, vol. 35, pp. 143-152.
36. **Rännar, L.E., et al.** 2007. "Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting", *Rapid Prototyp J*, vol. 13, pp. 128-135.
37. **DuPont, J., Marder, A.R.** 1995. "Thermal efficiency of arc welding processes", *Weld J*, vol. 74, pp. 406s-416s.
38. **McAndrew, A.R., et al.** 2018. "Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement", *Addit. Manuf.*, vol. 21, pp. 340-349.
39. **Baker, R.** 1925. "Method of making decorative articles"; US patent no. 1 533 300 1925.
40. **Acheson, R.** 1990. "Automatic welding apparatus for weld build-up and method of achieving weld build-up"; US patent no. 4 952 769 1990.
41. **Cotteleer, M., Joyce, J.** 2014. "3D opportunity – additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth", *Deloitte Rev.*, vol. 14.
42. **Spencer, J., Dickens, P., Wykes, C.** 1998. "Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding", *Proc Inst Mech Eng Part B - J Eng Manuf*, vol. 212, pp. 175-182.
43. **fronius.com**: "CMT Advanced", 2015. https://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-2BF524E9-5150258D/fronius_international/hs.xml/79_17482_ENG_HTML.htm.
44. **Shinn, B.W., Farson, D.F., Denney, P. E.** 2005. Laser stabilisation of arc cathode spots in titanium welding, *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 10 (4), pp. 475-481.
45. **Wang, F., et al.** 2013. "Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V", *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 44A (2), pp. 968-977.
46. **Martina, F., et al.** 2012. "Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212 (6), pp. 1377-1386.
47. **Dharmawan, A.G., Padmanathan, S., Xiong, Y., et al.** 2018. "Maximizing robot manipulator's functional redundancy via sequential informed optimization", *Proc. of 3rd Int. Conf. on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, 18-20 July 2018, Singapore, pp. 334-339.



48. **Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H.** 2015. "A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures", *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 34, pp. 8-19.
49. **Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., et al.** 2016. "Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation", *J. Clean Prod*, vol. 133, pp. 942-952.
50. **Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H.** 2015. "A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) ", *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 31, pp. 101-110.
51. **Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., et al.** 2016. "Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing", *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 39, pp. 32-42.
52. **Ding, D., Shen, C., Pan, Z., et al.** 2016. "Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part", *Comput Des*, vol.73, pp. 66-75.
53. **Sequeira Almeida, P.** 2012. "Process control and development in wire and arc additive manufacturing", Cranfield University, UK.
54. **Xiong, J., Yin, Z., Zhang, W.** 2016. "Closed-loop control of variable layer width for thinwalled parts in wire and arc additive manufacturing", *J Mater Process Technol*, vol. 233, pp. 100-106.
55. **Geng, H., Li, J., Xiong, J., et al.** 2017. "Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing", *J Mater Process Technol*, vol. 243, pp. 40-47.
56. **Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., et al.** 2011. "Thermomechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts", *Comput Mater Sci*, vol. 50, pp. 3315-3322.
57. **Zhang, S., Li, J., Kou, H., et al.** 2016. "Effects of thermal history on the microstructure evolution of Ti-6Al-4V during solidification", *J Mater Process Technol*, vol. 227, pp. 281-287.
58. **Denlinger, E.R., Heigel, J.C., Michaleris, P., Palmer, T.A.** 2015. "Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys", *J Mater Process Technol*, vol. 215, pp. 123-131.
59. **Cam, G., Flower, H.M., West, D.R.F.** 1991. "Constitution of Ti-Al-C alloys in the temperature range 1250-750 °C", *Mater. Sci. Tech.*, vol. 7 (6), pp. 505-511. doi: 10.1179/mst.1991.7.6.505
60. **Çam, G., İpekoğlu, G., Bohm, K.-H., Koçak, M.** 2006. "Investigation into the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded TiAl alloys", *J Mater Sci*, vol. 41 (16), pp. 5273-5282. doi: 10.1007/s10853-006-0292-4
61. **Çam, G., Clemens, H., Gerling, R., Koçak, M.** 1999. "Diffusion bonding of fine grained gamma-TiAl sheets", *Zeitschrift für Metallkunde*, vol. 90 (4), pp. 284-288.
62. **Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., et al.** 2010. "A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V", *Acta Mater*, vol. 58, pp. 3303-3312.



63. **Baufeld, B., Van der Biest, O., Gault, R.** 2009. "Microstructure of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition", *Int J Mater Res*, vol. 100, pp. 1536-1542.
64. **Lin, J., Lv, Y., Liu, Y., et al.** 2017. "Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment", *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 69, pp. 19-29.
65. **Lin, J., Lv, Y., Liu, Y., et al.** 2016. "Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing", *Mater Des*, vol. 102, pp. 30-40.
66. **Baufeld, B., Brandl, E., Van der Biest, O.** 2011. "Wire based additive layer manufacturing: comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition", *J Mater Process Technol*, vol. 211, pp. 1146-1158.
67. **Wang, F., Williams, S.W., Rush, M.** 2011. "Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy", *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 57, pp. 597-603.
68. **Brandl, E., Greitemeier, D.** 2012. "Microstructure of additive layer manufactured Ti-6Al-4V after exceptional post heat treatments", *Mater Lett*, vol. 81, pp. 84-87.
69. **Szost, B.A., Terzi, S., Martina, F., et al.** 2016. "A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components", *Mater Des*, vol. 89, pp. 559-567.
70. **Brandl, E., Baufeld, B., Leyens, C., Gault, R.** 2010. "Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications", *Phys Procedia*, vol. 5, pp. 595-606.
71. **Zhang, J., Zhang, X., Wang, X., et al.** 2016. "Crack path selection at the interface of wrought and wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V", *Mater Des*, vol. 104, pp. 365-375.
72. **Brandl, E., Schoberth, A., Leyens, C.** 2012. "Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM)", *Mater Sci Eng A*, vol. 532, pp. 295-307.
73. **Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C.** 2016. "Additive manufacturing of metals", *Acta Mater*, vol. 117, pp. 371-392.
74. **Hirata, Y.** 2003. "Pulsed arc welding", *Weld Int*, vol. 17, pp. 98-115.
75. **Kurkin, S., Anufriev, V.** 1984. "Preventing distortion of welded thin walled members of AMg6 and 1201 aluminum alloys by rolling the weld with a roller behind the welding arc", *Weld. Prod.*, vol. 31 (10), pp. 32-34.
76. **Colegrove, P.A., Coules, H., Fairman, J., et al.** 2013. "Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213 (10), pp. 1782-1791.
77. **Martina, F., Williams, S.W., Colegrove, P.A.** 2013. "Improved microstructure and inc-

- reased mechanical properties of additive manufacture produced Ti-6Al-4V by interpass cold rolling”, Proc. 24th Int. Solid Freeform Fabrication Symp., Austin, TX, USA, August 2013, University of Texas, pp. 490-496.
78. **Martina, F.** 2014. “Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale wire + arc additive manufacturing”, PhD thesis, Cranfield University, Cranfield, UK.
 79. **Hönnige, J.R., et al.** 2018. “Residual stress and texture control in Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured intersections by stress relief and rolling”, Mater. Des., vol. 150, pp. 193-205.
 80. **Martina, F., Roy, M.J., Szost, B.A., et al.** 2016. “Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components”, Mater. Sci. Technol., vol. 32, pp. 1439-1448.
 81. **Gu, J., Ding, J., Williams, S.W., et al.** 2016. “The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys”, J Mater Process Technol, vol. 230, pp. 26-34.
 82. **Wang, P., Hu, S., Shen, J., Liang, Y.** 2017. “Characterization the contribution and limitation of the characteristic processing parameters in cold metal transfer deposition of an Al alloy”, J Mater Process Technol, vol. 245, pp. 122-133.
 83. **Brice, C., Shenoy, R., Kral, M., Buchannan, K.** 2015. “Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing”, Mater Sci Eng A, vol. 648, pp. 9-14.
 84. **Cong, B., Ding, J., Williams, S.W.** 2015. “Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy”, Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 76, pp. 1593-1606.
 85. **Gu, J., Cong, B., Ding, J., Williams, S.W., Zhai, Y.** 2014. “Wire + arc additive manufacturing of aluminium”, Proc. 25th Int. Solid Freeform Fabrication Symp., August 2014, University of Texas, pp. 451-458.
 86. **Gu, J., et al.** 2016. “The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy”, Mater Sci Eng A, vol. 651, pp. 18-26.
 87. **Hönnige, J.R., Colegrove, P.A., Ganguly, S., et al.** 2018. “Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling”, Addit. Manuf., vol. 22, pp. 775-783.
 88. **Gu, J., Wang, X., Bai, J., et al.** 2018. “Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire+arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling”, Mater. Sci. Eng. A, vol. 712, pp. 292-301.
 89. **Fang, X., et al.** 2018. “Microstructure evolution and mechanical behavior of 2219 aluminum alloys additively fabricated by the cold metal transfer process”, Materials, vol. 11, 812.



90. **Horgar, A., Fostervoll, H., Nyhus, B., et al.** 2018. "Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 259, pp. 68-74.
91. **Çam, G., Ventzke, V., J.F. dos Santos, et al.** 1999. "Characterisation of electron beam welded aluminium alloys", *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 4 (5), pp. 317-323. doi: 10.1179/136217199101537941
92. **Çam, G., Koçak, M.** 2007. "Microstructural and mechanical characterization of electron beam welded Al-alloy 7020", *J. Mater. Sci.*, vol. 42 (17), pp. 7154-7161. doi: 10.1007/s10853-007-1604-z
93. **Çam, G., Ventzke, V., dos Santos, J.F., et al.** 1999. "Characterization of laser and electron beam welded Al-alloys", *Prakt. Metallogr.*, vol. 36 (2), pp. 59-89.
94. **Pakdil, M., Çam, G., Koçak, M., Erim, S.** 2011. "Microstructural and mechanical characterization of laser beam welded AA6056 Al-alloy", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528 (24), pp. 7350-7356. doi: 10.1016/j.msea.2011.06.010
95. **İpekoğlu, G., Çam, G.** 2019. "Formation of weld defects in cold metal transfer arc welded 7075-T6 plates and its effect on joint performance", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 629, 012007. doi: 10.1088/1757-899X/629/1/012007
96. **Serindağ, H.T., Çam, G.** 2020. "CMT ve darbeli CMT ark kaynaklı AA7075-T6 Al-alışımı alın bağlantıların mekanik davranışına kaynak hatalarının etkisinin araştırılması", *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 7, 100. Yıl Özel Sayısı, S. 248-262. doi: 10.35193/bseufbd.654456
97. **Heidarzadeh, A., Mironov, S., Kaibyshev, R., Çam G., Simar A., Gerlich A., Khodabakhshi F., Mostafaei A., Field D.P., Robson J.D., Deschamps A., Withers P.J.** 2021. "Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution", *Progress in Materials Science*, vol. 117, 100752. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752>
98. **Kashaev, N., Ventzke, V., Çam, G.** 2018. "Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications", *J Manuf Process*, vol. 36, pp. 571-600. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.10.005
99. **Çam, G., İpekoğlu, G.** 2017. "Recent developments in joining of aluminium alloys", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 91 (5-8), pp. 1851-1866. doi: 10.1007/s00170-016-9861-0
100. **Çam, G.** 2011. "Friction stir welded structural materials: Beyond Al-alloys", *Int. Mater. Rev.*, vol. 56 (1), pp. 1-48. doi: 10.1179/095066010X12777205875750
101. **Çam, G.** 2005. "Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) - Al-alışmaları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi", *Mühendis ve Makina*, Cilt 46 (541), S. 30-39.
102. **Von Strombeck, A., Çam, G., Dos Santos, J.F., Ventzke, V., Koçak, M.** 2001. "A comparison between microstructure, properties, and toughness behavior of power beam and friction stir welds in Al-alloys", In *Proc. of the TMS 2001 Annual Meeting Aluminum, Automotive and Joining (New Orleans, Louisiana, USA, February 12-14, 2001)*, eds: S.K. Das, J.G. Kaufman, and T.J. Lienert, pub.: TMS, Warrendale, PA, USA, pp. 249-264.



103. Çam, G., İpekoğlu, G., Tarık Serindağ, H. 2014. “Effects of use of higher strength interlayer and external cooling on properties of friction stir welded AA6061-T6 joints”, *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 19 (8), pp. 715-720. doi: 10.1179/1362171814Y.0000000247
104. İpekoğlu, G., Gören Kıral, B., Erim, S., Çam, G. 2012. “Investigation of the effect of temper condition friction stir weldability of AA7075 Al-alloy plates”, *Mater. Tehnol.*, vol. 46 (6), pp. 627-632. doi: 669.715:621.791:620.17
105. İpekoğlu, G., Erim, S., Gören Kıral, B., Çam, G. 2013. “Investigation into the effect of temper condition on friction stir weldability of AA6061 Al-alloy plates”, *Kovove Mater.*, vol. 51 (3), pp. 155-163. doi: 10.4149/km-2013-3-155
106. Çam G., Javaheri V., and Heidarzadeh A. 2022. “Advances in FSW and FSSW of Dissimilar Al-Alloy Plates”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, doi: <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2028073>
107. İpekoğlu, G., Çam, G. 2014. “Effects of initial temper condition and postweld heat treatment on the properties of dissimilar friction-stir-welded joints between AA7075 and AA6061 aluminum alloys”, *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 45A (7), pp. 3074-3087. doi: 10.1007/s11661-014-2248-7
108. İpekoğlu, G., Erim, S., Çam, G. 2014. “Investigation into the influence of post-weld heat treatment on the friction stir welded AA6061 Al-alloy plates with different temper conditions”, *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 45A (2), pp. 864-877. doi: 10.1007/s11661-013-2026-y
109. İpekoğlu, G., Erim, S., Çam, G. 2014. “Effects of temper condition and post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of friction stir butt welded AA7075 Al-alloy plates”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 70 (1), pp. 201-213. doi: 10.1007/s00170-013-5255-8
110. İpekoglu, G., Akçam, Ö., Çam, G. 2018. “Farklı kalınlıktaki AA6061-T6 levhaların sürtünme karıştırma kaynağı için uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi”, *Afyon Kocatepe Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi (AKÜ FEMÜBİD)*, Cilt 18 (1), 015901, S. 324-335. doi: 10.5578/fmbd.66765
111. İpekoglu, G., Çam, G. 2012. “Farklı Al-alaşımı levhaların (AA6061/AA7075) sürtünme karıştırma kaynağına temper durumunun etkisi”, *Mühendis ve Makina*, Cilt 53 (629), S. 40-47.
112. Agrawal, B.K. 2007. ‘Introduction to engineering materials’, Tata McGraw-Hill, New Delhi, India.
113. Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S.M., İpekoğlu, G., Çam, G. 2019. “Investigation of mechanical and microstructural properties of friction stir welded dual phase (DP) steel”, *IOP Conf. Series: Mater Sci and Eng*, vol. 629, 012010. doi: 10.1088/1757-899X/629/1/012010
114. İpekoğlu, G., Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S.M., Sekban, D.M., Çam, G. 2019. “Investigation of microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar St37/St52 joints”, *Materials Research Express*, vol. 6 (4), 046537. doi: 10.1088/2053-1591/aafb9f



115. **Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S.M., İpekoğlu, G., Çam, G.** 2018. “Mechanical properties of friction stir welded St 37 and St 44 steel joints”, *Materials Testing*, vol. 60 (12), pp. 1163-1170. doi: 10.3139/120.111266
116. **Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S.M., İpekoğlu, G., Çam, G.** 2018. “Microstructure and mechanical properties of friction stir welded St52 steel joints”, *Int. J. of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 25 (12), pp. 1457-1464. doi: 10.1007/s12613-018-1700-x
117. **İpekoğlu, G., Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S.M., Sekban, D.M., Çam, G.** 2018. “Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilen St37/St52 levhaların mikroyapı karakterizasyonu ve mekanik özellikleri”, *Fen ve Müh. Dergisi, Dokuz Eylül Üniv., Müh. Fak., Cilt. 20 (59)*, S. 471-480. doi: 10.21205/deufmd.2018205937
118. **Haden, C.V., Zeng, G., Carter III, F.M., et al.** 2017. “Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties”, *Addit. Manuf.*, vol. 16, pp. 115-123.
119. **Yılmaz, O., Uğla, A.A.** 2017. “Microstructure characterization of SS308LSi components manufactured by GTAW-based additive manufacturing: Shaped metal deposition using pulsed current arc”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, pp. 13-25.
120. **Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F., et al.** 2018. “Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications”, *Weld. World.*, vol. 62, pp. 259-266.
121. **Wang, L., Xue, J., Wang, Q.** 2019. “Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel”, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 751, pp. 183-190.
122. **Chen, X., et al.** 2017. “Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing”, *Mater Sci Eng A*, vol. 703, pp. 567-577.
123. **Posch, G., Chladil, K., Chladil, H.** 2017. “Material properties of CMT-metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries”, *Welding in the World*, vol. 61, pp. 873-882.
124. **Ge., J., Lin, J., Lei, Y., Fu, H.** 2018. “Location-related thermal history, microstructure, and mechanical properties of arc additively manufactured 2Cr13 steel using cold metal transfer welding”, *Mater Sci Eng A*, vol. 715, pp. 144-153.
125. **Ge., J., Lin, J., Lei, Y., Fu, H.** 2018. “Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties”, *Journal Alloys and Compounds*, vol. 748, pp. 911-921.
126. **Hofer, K., Haelsig, A., Mayr, P.** 2018. “Arc-based additive manufacturing of steel components-Comparison of wire- and powder-based variants”, *Welding in the World*, vol. 62, pp. 243-247.
127. **Çam, G., Koçak, M.** 1998. “Progress in joining of advanced materials - Part II: Joining of metal matrix composites and joining of other advanced materials”, *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 3 (4), pp. 159-175. DOI: 10.1179/stw.1998.3.4.159



128. **Çam, G., Koçak, M.** 1998. "Progress in joining of advanced materials", *Int. Mater. Rev.*, vol. 43 (1), pp. 1-44. DOI: 10.1179/imr.1998.43.1.1
129. **Wang, J.F., Sun, Q.J., Wang, H., Liu, J.P., Feng, J.C.** 2016. "Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 676, pp. 395-405.
130. **Juric, I., et al.** 2019. "Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625", *JOM*, vol. 71 (2), pp. 703-708.
131. **Xu, X., Ganguly, S., Ding, J., Seow, C.E., Williams, S.** 2018. "Enhancing mechanical properties of wire + arc additively manufactured INCONEL 718 superalloy through in-process thermomechanical processing", *Mater. Des.*, vol. 160, pp. 1042-1051.
132. **Xu, X., Ding, J., Ganguly, S., Williams, S.** 2018. "Investigation of process factors affecting mechanical properties of INCONEL 718 superalloy in wire + arc additive manufacture process", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 265, pp. 201-209.
133. **Baufeld, B.** 2012. "Mechanical properties of INCONEL 718 parts manufactured by shaped metal deposition (SMD)", *JMEP*, vol. 21 (7), pp. 1416-1421.
134. **Xu, F.J., Lv, Y.H., Liu, Y.X., et al.** 2013. "Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process", *J Mater Sci Technol*, vol. 29, pp. 480-488.
135. **Xu, F.J., Lv, Y.H., Liu, Y.X., et al.** 2013. "Effect of deposition strategy on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed plasma arc deposition", *Mater Des*, vol. 45, pp. 446-455.
136. **Wang, J.F., Sun, Q.J., Wang, H., et al.** 2016. "Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding", *Mater Sci Eng A*, vol. 676, pp. 395-405.
137. **Guo, J., Zhou, Y., Liu, C., et al.** 2016. "Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: grain refinement by adjusting pulse frequency", *Materials*, vol. 9, 823.
138. **Han, S., Zielewski, M., Holguin, D.M., et al.** 2018. "Optimization of AZ91D process and corrosion resistance using wire arc additive manufacturing", *Appl. Sci.*, vol. 8 (8), 1306.
139. **Ding, D., Pan, Z., van Duin, S., Li, H., Shen, C.** 2016. "Fabricating superior NiAl bronze components through wire arc additive manufacturing", *Materials*, vol. 9, 652.
140. **Shen, C., Pan, Z., Ding, D., et al.** 2018. "The influence of post-production heat treatment on the multi-directional properties of nickel-aluminum bronze alloy fabricated using wire-arc additive manufacturing process", *Addit. Manuf.*, vol. 23, pp. 411-421.
141. **Shen, C., Pan, Z., Ma, Y., Cuiuri, D., Li, H.** 2015. "Fabrication of iron-rich Fe-Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process", *Addit Manuf*, vol. 7, pp. 20-26.
142. **Shen, C., Pan, Z., Cuiuri, D., Dong, B., Li, H.** 2016. "In-depth study of the mechanical



- properties for Fe₃Al based iron aluminide fabricated using the wire-arc additive manufacturing process”, *Mater Sci Eng A*, vol. 669, pp. 118-126.
143. **Ma, Y., Cuiuri, D., Hoyer, N., et al.** 2014. “Characterization of in-situ alloyed and additively manufactured titanium aluminides”, *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 45, pp. 2299-2303.
 144. **Ma, Y., et al.** 2015. “Effect of interpass temperature on in-situ alloying and additive manufacturing of titanium aluminides using gas tungsten arc welding”, *Addit Manuf*, 2015; 8: 71-77.
 145. **Ma, Y., Cuiuri, D., Hoyer, N., Li, H., Pan, Z.** 2015. “The effect of location on the microstructure and mechanical properties of titanium aluminides produced by additive layer manufacturing using in-situ alloying and gas tungsten arc welding”, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 631, pp. 230-240.
 146. **Ma, Y., et al.** 2016. “The effect of postproduction heat treatment on γ -TiAl alloys produced by the GTAW-based additive manufacturing process”, *Mater Sci Eng A*, vol. 657, pp. 86-95.
 147. **Abe, T., Sasahara, H.** 2016. “Dissimilar metal deposition with a stainless steel and nickel based alloy using wire and arc-based additive manufacturing”, *Precis Eng*, vol. 45, pp. 387-395.
 148. **Liu, L., et al.** 2013. “Additive manufacturing of steel-bronze bimetal by shaped metal deposition: interface characteristics and tensile properties”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 69, pp. 2131-2137.
 149. **Tammam-Williams, S., Todd, I.** 2017. “Design for additive manufacturing with site-specific properties in metals and alloys”, *Scr. Mater.*, vol. 135, pp. 105-110.
 150. **Oliveira, J.P., Cavaleiro, A.J., Schell, N., et al.** 2018. “Effects of laser processing on the transformation characteristics of NiTi: A contribute to additive manufacturing”, *Scr. Mater.*, vol. 152, pp. 122-126.
 151. **Qi, Z., Cong, B., Qi, B., et al.** 2018. “Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys”, *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 255, pp. 347-353.
 152. **Wu, B., et al.** 2017. “Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in wire arc additive manufacturing of Ti6Al4V”, *J Mater Process Technol*, vol. 250, pp. 304-312.
 153. **Masubuchi, K.** 2013. “Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences”, Elsevier, Amsterdam.
 154. **Sames, W.J., List, F., Pannala, S., Dehoff, R.R., Babu, S.S.** 2016. “The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing”, *Int Mater Rev*, vol. 61, pp. 315-360.
 155. **Wang, H., Kovacevic, R.** 2011. “Rapid prototyping based on variable polarity gas tungsten arc welding for a 5356 aluminium alloy”, *Proc Instn Mech Engrs*, vol. 215, Part B, pp. 1519-1527.



156. **Mukherjee, T., Zhang, W., DebRoy, T.** 2017. "An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing", *Comput Mater Sci*, vol. 126, pp. 360-372.
157. **Edwards, P., O'Conner, A., Ramulu, M.** 2013. "Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance", *J Manuf Sci Eng*, vol. 135, 061016.
158. **Busachi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P.A., Martina, F., Ding, J.** 2015. "Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications", *Procedia Cirp*, vol. 37, pp. 48-53.
159. **Sames, W.J., Medina, F., Peter, W.H., Babu, S.S., Dehoff, R.R.** 2014. "Effect of process control and powder quality on inconel 718 produced using electron beam melting", 8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives. John Wiley & Sons, Inc., pp. 409-423.
160. **Devletian, J.H., Wood, W.E.** 1983. "Factors affecting porosity in aluminum welds - a review", *Welding Research Council*.
161. **Bai, J., Ding, H., Gu, J., Wang, X., Qiu, H.** 2107. "Porosity evolution in additively manufactured aluminium alloy during high temperature exposure", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 167, 012045.
162. **Colegrove, P.A., Donoghue, J., Martina, F., Gu, J., Prangnell, P., Hönnige, J.** 2017. "Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components", *Scr. Mater.*, vol. 135, pp. 111-118.
163. **Xie, Y., Zhang, H., Zhou, F.** 2016. "Improvement in geometrical accuracy and mechanical property for arc-based additive manufacturing using metamorphic rolling mechanism", *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 138, 111002.
164. **Sames, W.J., et al.** 2016. "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing", *Int Mater Rev*, vol. 61, pp. 315-360.
165. **Tian, Y., Ouyang, B., Gontcharov, A., et al.** 2017. "Microstructure evolution of Inconel 625 with 0.4 wt% boron modification during gas tungsten arc deposition", *J Alloys Compd*, vol. 694, pp. 429-438.