

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ VE KULLANILAN MALZEMELER

Onur Özsolak 1

Original scientific paper

Eklemeli imalat (AM) yönteminin uygulanması, zorlukları hakkında bir süreç geçmiş fakat araştırmalar hala devam etmektedir. Eklemeli imalat yöntemi tasarımdaki esneklik ve çoklu malzemeden oluşan parçaların imal edilebilmesini mümkün kılan bir imalat yöntemidir. Eklemeli imalat teknolojileri başlıca uzay ve havacılık, otomotiv, biyomedikal, savunma sanayi, enerji sektörü gibi önemli endüstri alanları için parça üretiminde kullanılmaktadır. Bu araştırmada eklemeli imalat yöntemleri ve bu yöntemde kullanılan malzemeler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Toz Malzemeler, Al Alaşımları, Ti Alaşımları

ADDITIVE MANUFACTURING OF METALS AND METHODS

The application and complexity of additive manufacturing (AM) has a progression about the challenges but the investigations about AM still continues. Additive manufacturing method is a manufacturing method that enables the flexibility in design and the fabricability of multi-material parts. The technology of additive manufacturing are used for important industrial areas such as space and aerospace, automotive, biomedical, defense industry, energy industry. In this research, additive manufacturing types and the materials used for this method were investigated.

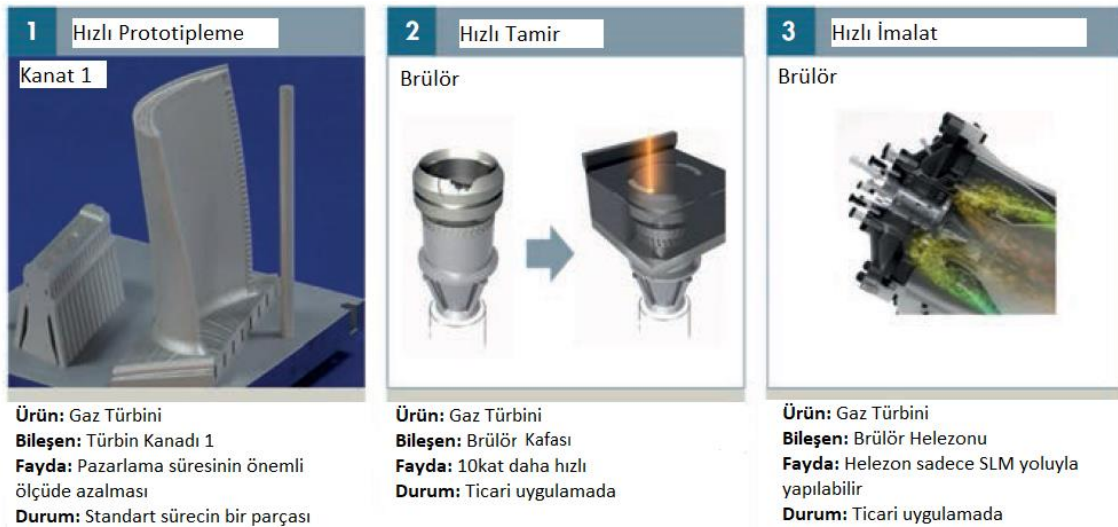
Keywords: Additive Manufacturing, Powder Materials, Al Alloys, Ti Alloys

1 Giriş

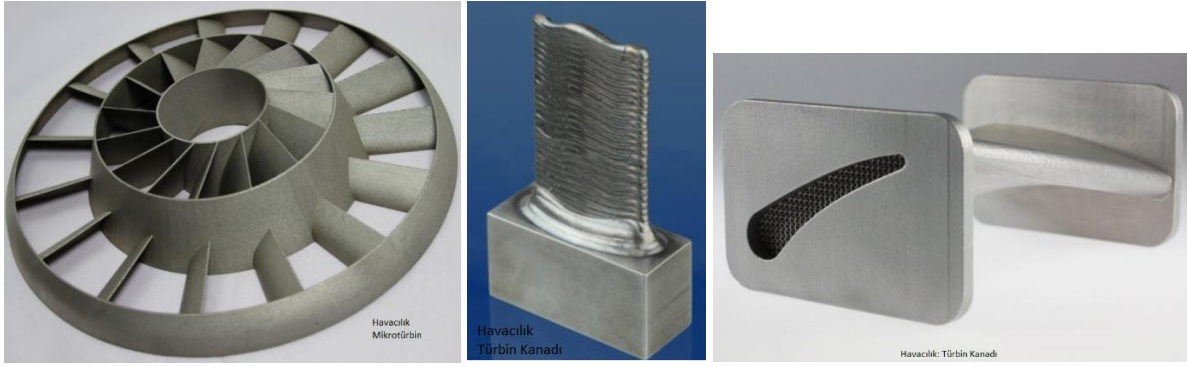
Eklemeli imalatın ortaya çıkışı parça üretiminde devrim yaratmıştır. Bu teknoloji, tasarımın iyileştirilmesini ve bileşenlerin hızlı bir şekilde üretilmesini sağlamıştır. Özellikle kompleks parçaların üretimini ve tamiratını kolaylaştırmıştır. Örneğin endüstriyel gaz türbin parçaları daha hızlı ve tam tasarım özgürlüğü ile onarılabilmektedir. Kompresör türbin kanadı tasarımı için AM teknolojisinin kullanılması, karmaşık çok elemanlı bileşenlerin üretiminde yüksek hassasiyete

ve çoğu durumda da daha yüksek performansa ulaşabilmeyi sağlamıştır. Eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilen ve ticari uygulamalarda kullanılan gaz türbini bileşenleri Şekil 1'de diğer endüstriyel uygulamalar Şekil 2'de gösterilmiştir.

Bu araştırmada eklemeli imalat yöntemleri ve bu yöntemlerde kullanılan metal malzemelerin nihai parça üzerindeki etkileri incelenerek literatürde konuyla ilgili mevcut çalışmalara ve sonuçlarına yer verilmiştir.



Şekil 1. Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen endüstriyel ürünler [1]



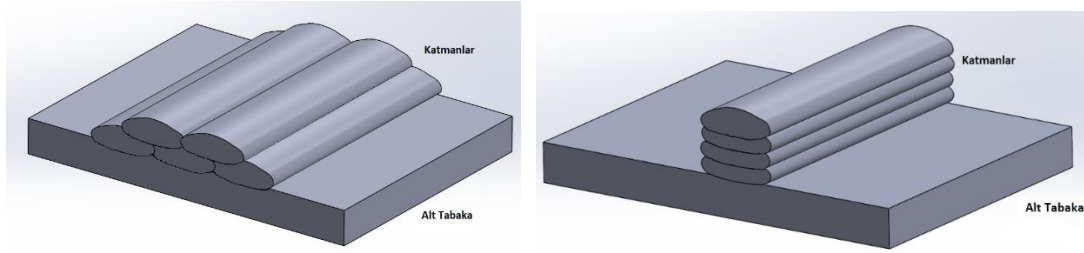
Şekil 2. Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen endüstriyel ürünler [2]

2 Materyal ve Metod

2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri

Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM International) AM'yi eksiltici imalat yöntemlerinin aksine, 3B model verilerinden nesnel oluşturmak için genellikle katman üzerine katmanlı malzeme birleştirme işlemi olarak tanımlamaktadır [3].

Metal bir parçanın eklemeli imalat teknolojileri ile üretimi, 3 boyutlu modelleme ile başlar. Ardından veri hazırlığının organize edilmesi gereklidir ve parça yönünün tanımı, destek yapılarının konumları ve modelin dilimlenmesini içerir. Parçanın üretilmesinden sonra, son işlem (post processing) operasyonları gereklidir. Şekil 3'de şematik olarak katmanların oluşturulması gösterilmektedir [2].



Şekil 3. Eklemeli imalatta katmanların oluşturulması [2]

Çok sayıda eklemeli üretim süreci günümüzde mevcuttur. Bu yöntemler malzemelerin birikerek katmanların oluşturulması, parça oluşturma, çalışma prensibi bakımından farklılık göstermektedir.

Bazı metotlar, örneğin seçici lazer eritme (SLM), seçici lazer sintereleme (SLS) ve eriyik biriktirme (FDM) gibi katmanları üretmek için malzemeleri eritir veya yumuşatır, diğerleri ise stereolitografi (SLA) gibi sıvı malzemeleri birleştirir. Her yöntemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır ve bazı imalatçılar sonuç olarak parçanın oluşturulacağı malzeme için toz ve polimer arasında bir seçim sunmaktadır.

Literatürde eklemeli imalat yöntemleri için araştırmacıların ve sektörün kullandığı yöntemler için Tablo 1'de gösterilen terminoloji kullanılmaktadır.

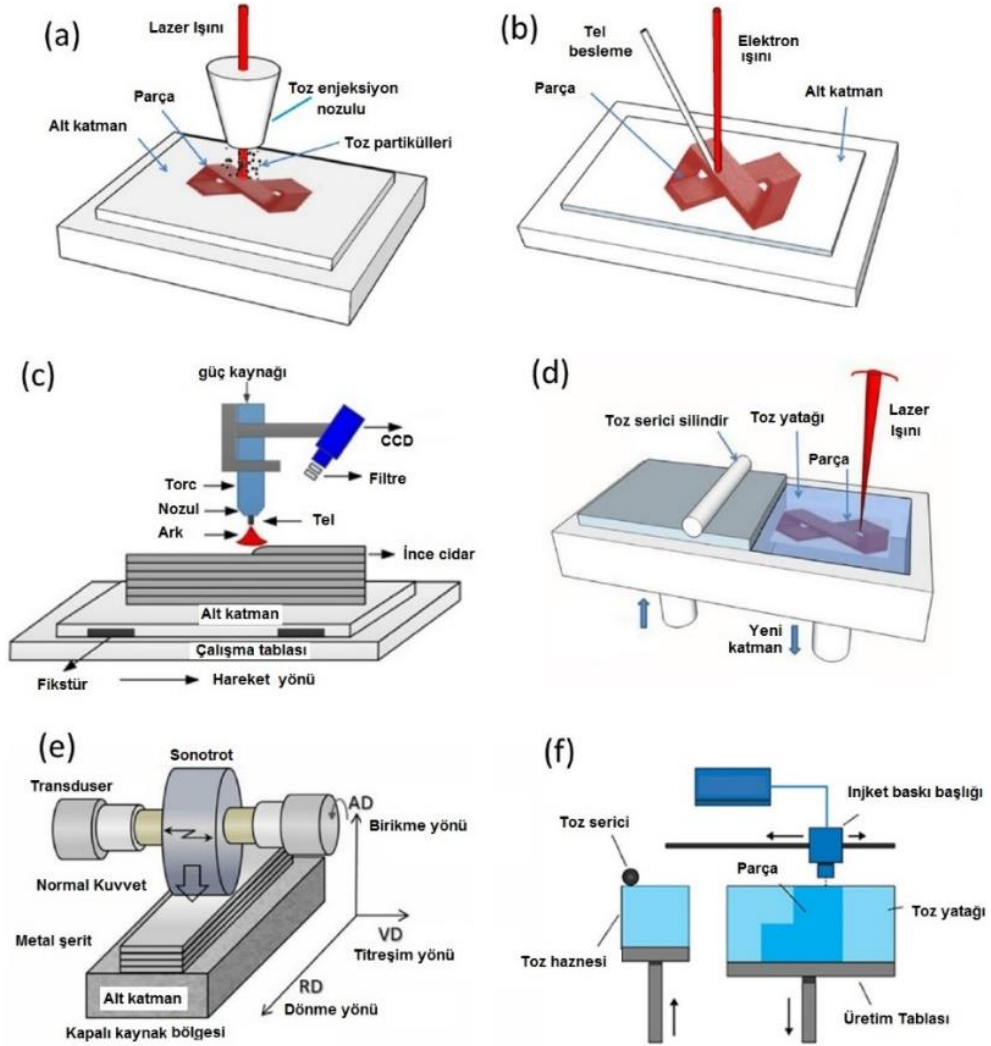
Eklemeli imalat, aynı zamanda, geleneksel olarak imal edilmiş parçaların tümleşik bileşenlerinin üretilmesine de olanak sağlar. Genel olarak ağırlığın ve bağlantı / bağlantı elemanlarının sayısının azaltılması için bir fırsat sağlar [5]. Bugüne kadar, insansız hava araçları (İHA'lar), yakıt

nozulları odaları, takımlar, biyomedikal implantlar dahil olmak üzere AM uygulamaları ile yapılmıştır.

Herzog ve ark., mevcut birçok teknoloji olmasına rağmen endüstriyel uygulamaların gereksinimlerini karşılayan sadece birkaç yöntem ile metal parçalar üretilebilmekte olduğunu belirtmişlerdir [4]. Bundan dolayı, imalat yöntemi, mikro yapı ve iç yapı arasındaki ilişkinin etkilerini detaylı olarak incelemenin daha faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Eklemeli imalat yöntemleri Lazer Işını ile Eritme (LBM), Elektron Işını ile Eritme (EBM) ve Lazer ile Metal Biriktirme (LMD) yöntemleridir. Şekil 4'de bazı AM yöntemleri ve şematik gösterimleri mevcuttur [6].

Tablo 1. Eklemeli İmalat Terminolojisi

Yöntemin Adı ve Kısaltması	Türkçe Karşılığı	Açıklama
1. Additive Manufacturing (AM)	Eklemeli İmalat	
2. Additive Layer Manufacturing (ALM)	Katmanlı Üretim	
3. Laser Metal Deposition (LMD)	Lazer Metal Biriktirme	3.ve 4. Terimler aynı yöntem için kullanılmaktadır [4].
4. Direct Metal Deposition (DMD)	Doğrudan Metal Biriktirme	
5. Electron Beam Melting (EBM)	Elektron Işın Ergitme	
6. Laser Beam Melting (LBM)	Lazer Işın Ergitme	6.ve 7. Terimler aynı yöntem için kullanılmaktadır [4].
7. Selective Laser Melting (SLM)	Seçimli Lazer Ergitme	
8. Selective Laser Sintering (SLS)	Seçimli Lazer Sinterleme	
9. Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Doğrudan Lazer Metal Sinterleme	
10. Powder Bed Fusion	Toz Yatak Kaynaştırma	
11. Powdered Fusion	Toz Besleme Kaynaştırma	
12. Laser Cladding	Lazer Kaplama	
13. Laser-Based Additive Manufacturing (LBAM)	Lazer Destekli Eklemeli İmalat	



Şekil 4. Çeşitli AM yöntemlerinin şematik gösterimi (a) DED-L (b) DED-EB (c) DED-GMA (d) PBF-L (e) Ultrasonik eklemeli imalat (UAM) (f) Jet birleştirme [6]

(L: Lazer, EB: Elektron Işını, GMA: Gaz Metal Ark)

2.2 Eklemeli İmalatta Kullanılan Toz Malzemeler

Geleneksel imalat yöntemlerinde malzemenin eksilti olarak şekillendirilmesi söz konusu iken bu metotların aksine, eklemeli imalat, ürünün ana malzemesinin artırılarak katman üzerine katman şeklinde imalatı esasına dayanmaktadır [7]. AM teknolojilerinde kullanılan malzemeler toz veya tel formunda olup, bir parça oluşturmak üzere odaklanmış bir ısı kaynağı tarafından seçici olarak eritilen malzemenin eş zamanlı birleştirme ve katılma işlemi için de besleme stoğu olarak kullanılmaktadır [8,5].

Çelik, alüminyum ve titanyum dahil olmak üzere bazı malzemeler için güvenilir ve yoğunluklu parçalar AM yöntemi ile imal edilmesi gelişen teknoloji ile mümkündür [9].

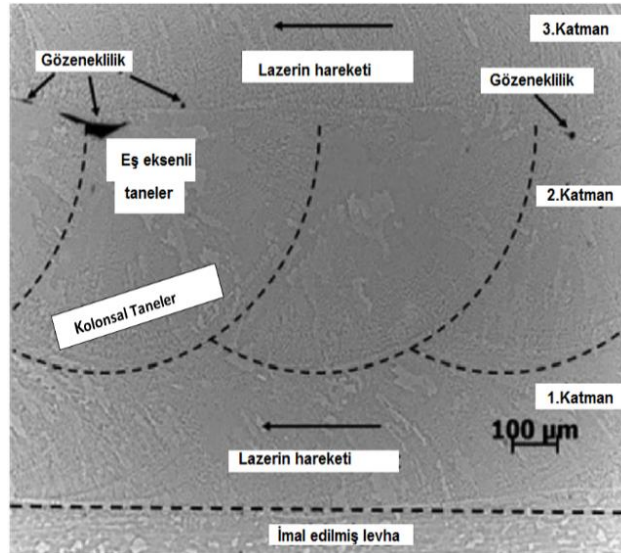
Eklemeli imalat yönteminde kullanılan metal tozlarının çoğu genel olarak metal tozu üretimi için iyi bilinen teknolojiler kullanılarak üretilir. Bu yöntemler su, gaz veya plazma atomizasyonudur. Genellikle, AM işleminde, tozun homojen yayılmasını sağlamak için iyi

akış özelliklerine ve yüksek nispi yoğunluklu bir toz tabakasının oluşumu için iyi paketleme özelliklerine ihtiyaç duyulur. Kullanılan tozun özellikleri, imal edilen parçanın yoğunluğunu ve gözeneklilik gibi özelliklerini etkiler. En basit ve düşük maliyetli atomizasyon süreci su atomizasyonudur. AM yöntemlerinde kullanılan malzemelerin özellikleri son parçanın özelliklerini etkilemektedir [10].

2.2.1 Çelikler

Çelik hala en yaygın mühendislik malzemesidir [11]. Bu nedenle, çelik de açıkça AM için yüksek ilgi gören bir malzemedir. LMD için östenitik paslanmaz çelik (316L) [12,13,14] ve takım çeliği (H13) [15] kullanımı da literatürde yerini almıştır.

Şekil 5 'de LMD ile 3 katmanlı olarak imal edilmiş östenitik paslanmaz çelik (316L) için kesit görüntüsüne yer verilmiştir [12]. Lazerin izleri de kesit görüntüsüyle tespit edilmiştir.



Şekil 5. LMD ile 3 katmanlı olarak imal edilmiş östenitik paslanmaz çelik (316L) için kesit görüntüsü [12]

2.2.2 Alüminyum Alaşımları

AM için kullanılabilen farklı Al alaşımlarının sayısının daha ziyade sınırlı olmasının nedeni Alüminyumun Titanyumun aksine işlenebilirliğinin kolay olması ve Al parçaların maliyetinin nispeten düşük olmasıdır [16]. Alüminyumun AM ile imalatı, bu nedenle, genellikle daha düşük ticari avantaja sahiptir. Bir başka sebep ise, birçok Al alaşımının kaynaklanmasının zor olduğunun bilinmesidir. Yüksek performanslı alaşımlar genel olarak mukavemetlerini çökeltme sertleşmesinden alırlar.

Büyük ölçüde sertleştirilebilen bazı alaşımlar, ör. Al-Zn 7xxx serisinin EN AW-7075 'i, Zn gibi aşırı uçucu

elementler içerir, bu da eriyik havuzunun türbülansına, sıçramaya ve gözenekliliğe yol açar ve bu nedenle AM ile imalat için uygun değildir ya da kullanımı kolay değildir. Mevcut araştırmalar böyle alaşımların AM ile imalatının geliştirilmesi için umut vericidir [17].

Vakum koşulları altında çok farklı bir buhar basıncına sahip alaşım elementlerinin tercihen buharlaştırıldığı bilinmektedir. Ek olarak Al, LBM ve LMD 'de uygulanan lazer dalga boyları için yüksek bir yansıtıcılığa sahiptir, bu da AM ile üretilen Al parçalarının bir başka engeli olarak görülebilir [16]. Erimiş Al 'in düşük viskozitesi bir başka problemdir ve alüminyumun eklemeli imalatını küçük eriyik havuz boyutlarına sınırlar bu durum LBM 'nin LMD'ye göre üstün olduğunu kanıtlar niteliktedir.

Al parçalarının AM ile imalatı için daha avantajlı tarafı Al 'in yüksek ısı iletkenliği termal olarak indüklenen gerilmeleri azaltır, böylece destek yapılarına olan ihtiyacı da azaltır. Ek olarak, yüksek termal iletkenlik daha yüksek işlem hızlarına izin verir.

2.2.3 Titanyum ve Alaşımları

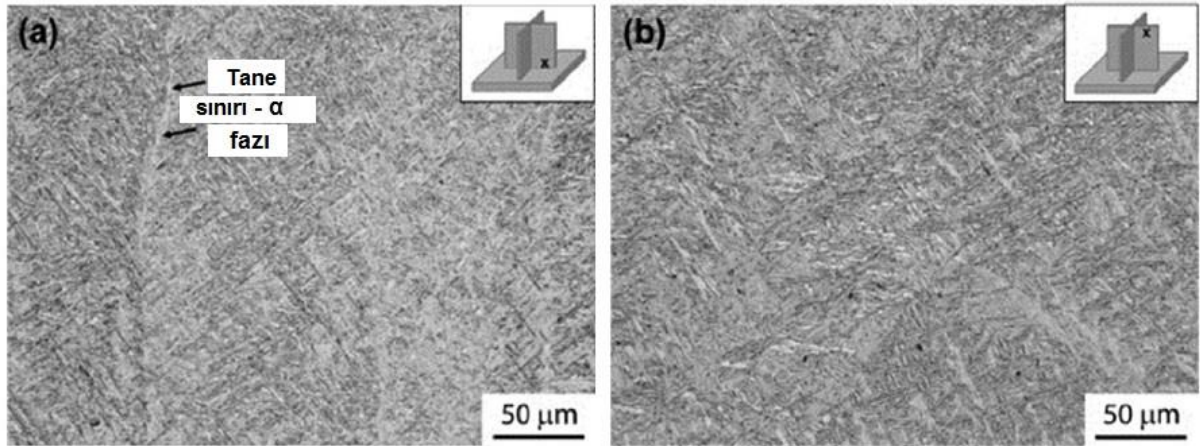
Ti ve Ti alaşımları AM yöntemi için son derece ilgi çekicidir. Ti yüksek performans gerektiren parçalarda, yüksek işleme maliyeti ve geleneksel işlemede uzun teslim süreleriyle endüstriyel uygulamaları vardır.

LBM, EBM ve LMD yöntemleri Ti-6Al-4V parçalar imal etmek için başarıyla uygulanmıştır [4]. Farklı AM işlemlerinden elde edilen sonuçlar, AM işlemlerinin ve sonuç özelliklerinin karşılaştırılmasını da oldukça cazip hale getirmektedir. Çok çeşitli alaşım bileşimi ve ilgili mikroyapı, Ti 'nin allotropisinin yüksek sıcaklık gradyanları ve karmaşık termal çevrimleri ile genellikle AM 'de yer almaktadır. Ti esaslı alaşımların mikroyapı ve özelliklerinin AM ile değişimi arasındaki ilişki araştırmalar için en ilgi çekici konulardan biri haline gelmiştir.

2.2.3.1 Ti-6Al-4V LMD Yöntemi ile İmalatı

LBM ve EBM yönteminde oluşan ön sütunlu β -taneler Ti-6Al-4V LMD 'de de gözlenmiştir [18,19]. LMD 'nin yüksek tabaka kalınlığı ile bile, önceki β -taneler kristal doğrultusu anayapı ile aynı olarak büyür, (epitaksiyal) birkaç kat boyunca uzanır ve 1.5 mm ile > 10 mm uzunluğa ulaşır. Yapı yönüne dik, tanelerin genişliği ortalama 375 μ m olarak bulunmuştur. Tanecik sınırı, önceki β -tanelerin sınırları üzerinde tespit edilen bir fazdır. Şekil 6 LMD ile imal edilmiş Ti-6Al-4V için bölgeye bağlı iç yapı görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 6 üzerinde gösterilen katman için bölgesel olarak iç yapıya bakılmış ve farklı yapılar tespit edilmiştir [8].

Baufeld ve ark., aynı zamanda dereceli bir mikro yapıyı da rapor etmişlerdir, ancak üç alanı ayırt etmişlerdir. Soğutma oranının en yüksek olduğu taban plakasına yakın, küçük bir α -lamel bulunmuştur ve izgara benzeri yapı, α ' martensit varlığına işaret etmiştir. En çok üst katmanlarda hakim olan yapı tane sınırlarında başlayan ($\alpha+\beta$) kolonlarıdır [19].



Şekil 6. LMD ile imal edilmiş Ti-6Al-4V için bölgeye bağlı iç yapı görüntüleri a) α - fazlı tane sınırları ince lamelli Widmanstaätten yapısı (alt kısımdan) b) Daha kaba bir yapı (üst kısımdan) [8]

3 Bulgular ve Sonuç

Ekleme imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler ile ilgili uluslararası çalışmalar incelenerek bu makale hazırlanmıştır. Literatürdeki eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan terimlere yer verilmiştir. Bu imalat yönteminde yaygın olarak kullanılan metal malzemeler ve uygulama örnekleri incelenmiştir.

Bu araştırma ile aşağıdaki bazı sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Eklemeli imalat yöntemi tasarımdaki esneklik ve çoklu malzemedan oluşan parçaların imal edilebilmesini mümkün kılan bir imalat yöntemidir.
2. Eklemeli imalat teknolojileri başlıca uzay ve havacılık, otomotiv, biyomedikal, savunma

sanayi, enerji sektörü gibi önemli endüstri alanları için parça üretiminde kullanılmaktadır.

3. Eklemeli İmalat yöntemleri malzemelerin birikerek katmanların oluşturulması, parça oluşturma, çalışma prensibi bakımından farklılık göstermektedir.
4. Eklemeli İmalat yöntemlerinde kullanılan malzemelerin özellikleri son parçanın özelliklerini etkilemektedir.
5. AM yöntemlerinde katmanlar malzemenin bir ısı kaynağı ile lokal olarak eritilmesiyle oluşturulduğundan sıklıkla araştırmacıların tercih ettiği malzemelerin termo fiziksel özellikleri önem arz etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, 2018 - 1. Dönem - TÜBİTAK 2219 Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı kapsamında, “Lazer ile Metal Biriktirme Yöntemiyle Eklemeli İmalatta Isı Tesiri Etkisinde Kalan Bölgenin Sayısal ve Deneysel Olarak Araştırılması” adlı proje ile desteklenmeye değer bulunmuştur. TÜBİTAK’a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

4 Kaynaklar

- [1] Navrotsky, V., Graichen, A. & Brodin, H. (2015). Industrialisation of 3D printing (Additive Manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing, VGB PowerTech Autorexemplar, 12, pp.48-52.
- [2] EPMA Raporu. (2018). <http://eklemeliimalat.info.tr/>.
- [3] ASTM-International. (2012). ASTM Standard F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.
- [4] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, pp.371–392, <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>.
- [5] Brandl, E., Palm, F., Michailov, V., Viehweger, B. & Leyens, C. (2011). Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by a solid-state laser and wire. *Mater. Des.* 32, pp.4665-4675.
- [6] DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O. & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, pp.112–224, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
- [7] Emmelmann, C., Kranz, J., Herzog, D. & Wycisk, E. (2013). Laser additive manufacturing of metals, in: V. Schmidt, M.R. Belegriatis (Eds.), *Laser Technology in Biomimetics*, Springer, Heidelberg, pp.143-161.
- [8] Carroll, B.E., Palmer, T.A., Besse, A.M. (2015). Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Mater.*, 87, pp.309-320.
- [9] Murr, L.E., Gaytan, S.M., Ramirez, D.A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K.N., Shindo, P.W., Medina, F.R. & Wicker, R.B. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting Technologies. *J. Mater. Sci. Technol.*, 28 (1), pp.1-14.
- [10] Nandan, R., DebRoy, T. & Bhadeshia, H.K.D.H. (2008). Recent advances in friction-stir welding- process, weldment structure and properties. *Prog Mater Sci*, 53 (6), pp.980–1023.
- [11] Agrawal, B.K. (2007). *Introduction to Engineering Materials*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, p. 79.
- [12] Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S.M. & Seely, D.W. (2015). Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel. *Mater. Sci. Eng. A*, 644, pp.171-183.
- [13] Majumdar, J.D., Pinkerton, A., Liu, Z., Manna, I. & Li, L. (2005). Microstructure characterisation and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel. *Appl. Surf. Sci.*, 247, pp.320-327.
- [14] Mahmood, K. & Pinkerton, A.J. (2013). Direct laser deposition with different types of 316L steel particle: a comparative study of final part properties. *J. Eng. Manuf.*, Vol. 227 (4), pp.520-531.

- [15] Mazumder, J., Choi, J., Nagarathnam, K., Koch, J. & Hetzner, D. (1997). The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components. *JOM*, 49 (5), pp.55-60.
- [16] Brice, C., Shenoy, R., Kral, M. & Buchannan, K. (2015). Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing. *Mater. Sci. Eng. A*, 648, pp.9-14.
- [17] Bartkowiak, K., Ullrich, S., Frick, T. & Schmidt, M. (2011). New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique. *Phys. Procedia*, 12, pp.393-401.
- [18] Tan, X., Kok, Y., Tan, Y.J., Descoins, M., Manginck, D., Tor, S.B., Leong, K.F. & Chua, C.K. (2015). Graded microstructure and mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting. *Acta Mater.*, 97, pp.1-16.
- [19] 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. Proc Tech.*, 211, pp.1146-1158.

Authors' addresses

Onur Özsolak 1

Sivas Cumhuriyet University
Faculty of Technology
Department of Manufacturing Engineering
onurozsolak@gmail.com